

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Estudio Ambiental Comparativo entre Centrales Eléctricas de Gas Natural Con y Sin Captura de CO<sub>2</sub>



Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico

Trabajo Fin de Grado

Victor Goñi Mateos

Dr. Alberto Navajas / Dr. Teresa Mendiara

Tudela, Mayo 2017



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar gracias al Dr Alberto Navajas por su disponibilidad, animarme y confiar en mí desde un primer momento en el que le propuse la dirección de mi trabajo de fin de estudios. Así como a la Dr Teresa Mendiara, también, por su disponibilidad e inmediatez a la hora de resolver cualquier tipo de duda que surgiera. Mi más sincero Agradecimiento a los dos por la dirección de este trabajo, por su atenta supervisión, por el apoyo y los buenos consejos que me han dado a lo largo de este proyecto.

Agradecer al personal del Instituto de Carboquímica de Zaragoza (C.S.I.C.) por su atención en especial a Dr Francisco Labiano por la ayuda aportada y las explicaciones recibidas durante la visita.

A mis padres, a quienes les dedico este trabajo y les agradezco su apoyo incondicional, escuchándome siempre que lo he necesitado y apoyándome en todas mis decisiones. No quisiera olvidar a mis hermanas, gracias por estar ahí siempre que os he necesitado a pesar de los kilómetros que a lo largo de estos años nos han separado.

A mis amig@s y familiares por interesaros por mí, en especial mis compañeros de carrera los cuales han hecho que estos años hayan sido inolvidables. A Irune por escucharme, ser paciente, apoyarme y animarme.

## RESUMEN

En el presente trabajo se trata de comparar los impactos medioambientales producidos por un lado por una central de gas natural de ciclo combinado, frente a los impactos producido por una central en la cual se captura el CO<sub>2</sub> mediante una técnica de pre combustión. Para ello se evaluarán los efectos que se producen en las dos fases que se realizan en las centrales de C.L.C. (Chemical Looping Combustion) que son la producción del transportador y la parte de la central.

También se examinarán las centrales que utilizan la captura de CO<sub>2</sub> con distintos porcentajes de recuperación de transportador.

Todo esto se realizara mediante la herramienta de análisis de ciclo de vida (A.C.V.) y con la ayuda del software llamado Gabi.

## LISTA DE PALABRAS CLAVE

Chemical Looping Combustion (C.L.C.): Se trata de la tecnología de que captura el CO<sub>2</sub> en las centrales de gas natural con la ayuda de transportadores de oxígeno.

Impactos Ambientales: Son los efectos que produce la acción humana sobre el medio ambiente.

Análisis de Ciclo de Vida (A.C.V.): Es la herramienta utilizada para evaluar los impactos ambientales de diferentes procesos.

## ÍNDICE

1_ INTRODUCCIÓN	1
1.1_ EL PROBLEMA ENERGÉTICO Y CONTAMINACIÓN	2
1.2_ CENTRALES DE CICLO COMBINADO CON COMBUSTION DE GAS NATURAL	4
1.3- TECNOLOGÍAS DE CAPTURA, TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE CO <sub>2</sub>	5
1.4_ CHEMICAL LOOPING COMBUSTION (CLC)	8
1.5. MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL TRANSPORTADOR DE OXÍGENO	9
1.6_ ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	12
1.7_ OBJETIVO	13
2_ ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	13
2.1_ DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y DEL ALCANCE	14
2.2_ ANÁLISIS DEL INVENTARIADO	14
2.2.1_ CLC	14
2.2.2_ CONVENCIONAL	17
2.3_ EVALUACIÓN DEL IMPACTO	18
2.3.1_ INDICADORES DE NIVEL I	19
2.3.2_ INDICADORES DE NIVEL II	19
2.3.2_ INDICADORES DE NIVEL II / III	20
2.3.2_ INDICADOR DE NIVEL III	20
2.4_ RESULTADOS	20
2.4.1. ACV de 1 kg de transportador de NiO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21
2.4.2. IMPACTOS CENTRAL CLC	23
2.4.3. COMPARACIÓN CENTRAL CONVENCIONAL vs C.L.C	29
3_ CONCLUSIONES	33
4_ BIBLIOGRAFÍA	35



## 1\_ INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), junto a otros gases de efecto invernadero como el metano o el óxido nitroso, provocan que parte de la radiación solar que refleja la tierra no se pierda en el espacio y que la temperatura media de la tierra esté entre los 20-30 C. Así, los gases de efecto invernadero son necesarios para la vida sobre la tierra ya que sin su presencia el balance térmico provocaría temperaturas bajo cero. Sin embargo, durante el siglo XX y lo que llevamos de este siglo, se ha emitido gran cantidad de  $\text{CO}_2$  como resultado de la combustión de residuos fósiles. Esto ha provocado que la concentración de gases de efecto invernadero haya crecido mucho y con ello la parte de energía retenida por la atmósfera, dependiente de esta concentración.

El aumento de las temperaturas debido al aumento de concentraciones de gases efecto invernadero en la atmósfera es uno de los problemas más graves a los que se enfrenta la comunidad científica y la sociedad en general, y por ello son muchas las propuestas que se han hecho para evitar la emisión de estos gases.

Uno de los grandes focos de emisiones son las centrales de energía eléctrica de combustión de gas natural. Para intentar reducir este tipo de emisiones se han desarrollado diferentes ideas encaminadas a la captura del  $\text{CO}_2$  una vez emitido. Una de las tecnologías de captura de  $\text{CO}_2$  que cuenta con un más futuro prometedor, es la basada en la combustión con transportadores de oxígeno (Chemical Looping Combustion, CLC) que consiste en realizar la combustión únicamente con el oxígeno aportado por unos transportadores metálicos sólidos. Una vez conseguido esto, los gases de combustión están compuestos mayoritariamente por  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . El  $\text{CO}_2$  se puede capturar tras eliminar el vapor de agua por condensación, evitando así el uso de costosos sistemas de separación de gases, y almacenarlo sin emitirlo a la atmósfera.

Desde el punto de vista medioambiental, parece claro que las centrales CLC serán menos impactantes que las convencionales sin sistemas de captura de  $\text{CO}_2$ , pero para llegar a esta conclusión también hay que tener en cuenta los impactos ambientales de la fabricación y tratamiento de los transportadores de oxígeno, así como la eficiencia global del proceso. Por todo esto, en este trabajo se va a tratar de comparar los impactos medioambientales a lo largo de un tiempo de vida de 25 años que ocasionan una central térmica de ciclo combinado frente a una central que incorpora un sistema CLC para llevar a cabo la combustión. La herramienta utilizada para la cuantificación de impactos va a ser el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

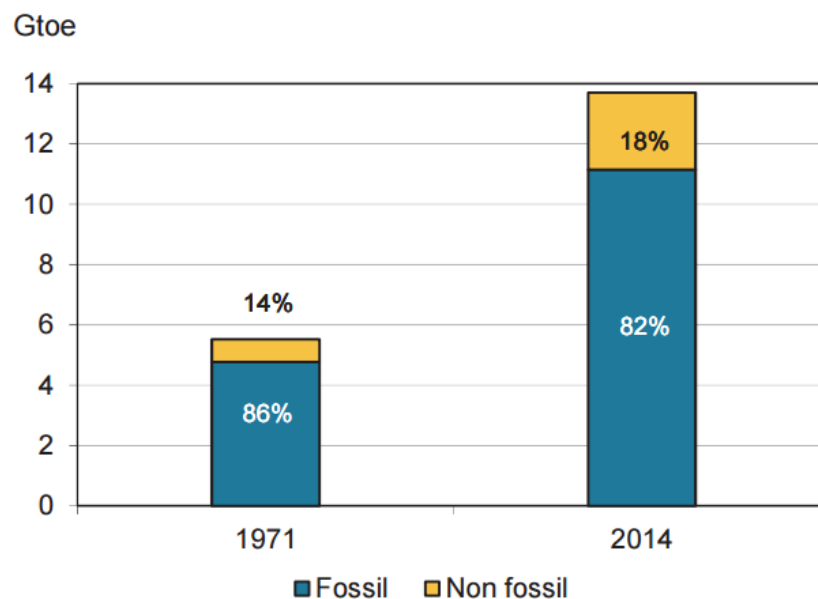
## 1.1\_ EL PROBLEMA ENERGÉTICO Y CONTAMINACIÓN

El ser humano a lo largo de su evolución ha necesitado de los combustibles fósiles para la obtención de energía y calor. Estos recursos fósiles son no renovables, los cuales tienen fin y es necesaria realizar una combustión con ellos para explotar su energía.

Este tipo de recursos tienen el inconveniente de que no se pueden volver a utilizar y que se tardaría millones de años en volver a generarlos. Por lo tanto una de las soluciones que se han propuesto para combatir este problema es el uso de las energías renovables. Además, muchas de las energías renovables, como la eólica o la hidráulica, no emiten gases efecto invernadero.

Las energías renovables son variadas y provienen todas de recursos naturales. Únicamente se necesitan infraestructuras para llevarlas a cabo y colocarlas en el lugar adecuado. Algunas de ellas ya se conocen, como son la energía eólica, solar, hidráulica, etc.

Se sabe que en la actualidad se consume mayor cantidad de energía que hace unas décadas pero la mayoría de energía proviene de las mismas fuentes, tal y como se puede ver en la Figura 1.



**Figura 1.** Incremento de consumo de energía (IEA, 2016)

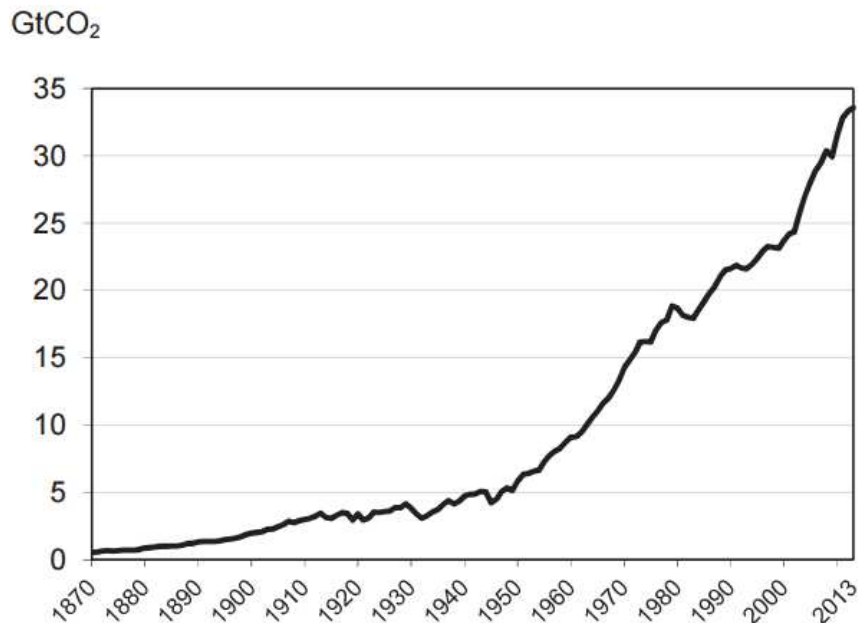
Como se puede observar, se consume casi el triple de energía que hace algo más de cuarenta años. Otro dato a resaltar son los porcentajes de las fuentes que siguen siendo parecidos. La energía proveniente de los combustibles fósiles supone más del 80% del total mientras que las que nos son fósiles no llegan al 20%.

Por lo tanto, al parecer, la solución aportada por las energías renovables, no puede abarcar toda la demanda de energía que se necesita, por lo que no se puede abolir las formas de producir electricidad mediante combustión de combustibles fósiles.



Dejando al margen el problema del agotamiento de recursos fósiles ya que al parecer existen yacimientos que nos pueden abastecer durante un largo periodo de tiempo, el otro problema que se nos presenta con el uso de las energías producidas por combustibles fósiles, son las emisiones que generan. Como ya se ha comentado en el apartado anterior, uno de los mayores retos a los que se enfrenta la sociedad es la emisión masiva de CO<sub>2</sub>.

En la Figura 2 se puede ver el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera a los largo del tiempo.

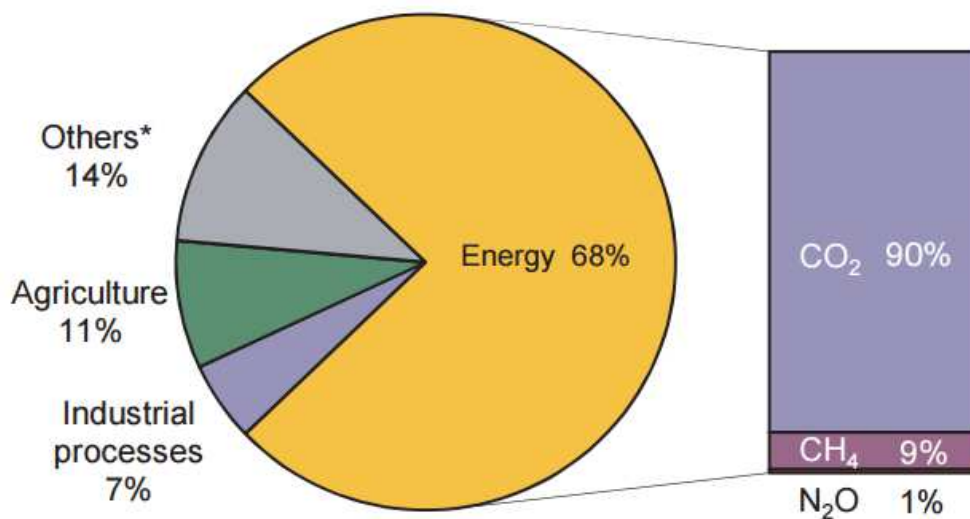


**Figura 2.** Concentración de CO<sub>2</sub> con respecto al tiempo (IEA, 2016)

Como se puede observar, la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmosfera está creciendo de forma exponencial. Por poner un ejemplo, los datos correspondientes a 1980 comparados con los de 2013 son la mitad de concentración. Esto se debe a que como se ha visto en la Figura 1, la producción de energía ha aumentado casi al triple con lo que las emisiones también.

De acuerdo a los datos que proporciona la Agencia Internacional de Energía (IEA) debemos preocuparnos por los efectos negativos de la emisión masiva de CO<sub>2</sub>. Según un estudio realizado por el instituto Goddard de la NASA, en Marzo de 2016 se llegó a un incremento de temperatura por encima de la media de 6,9º C. Fue el Marzo más cálido desde 1880. Otro dato que se debe resaltar de esta fuente es que recientemente se ha comprobado que Abril de 2017 fue el segundo abril más cálido en 137 años tras Abril del 2000. (Cabbage & McCarthy, 2017)

En la Figura 3 se puede observar una gráfica en la que se indican los porcentajes de las emisiones más preocupantes junto con los procesos que más las emiten.



**Figura 3.** Porcentajes de emisiones y procesos que las emiten (IEA, 2016)

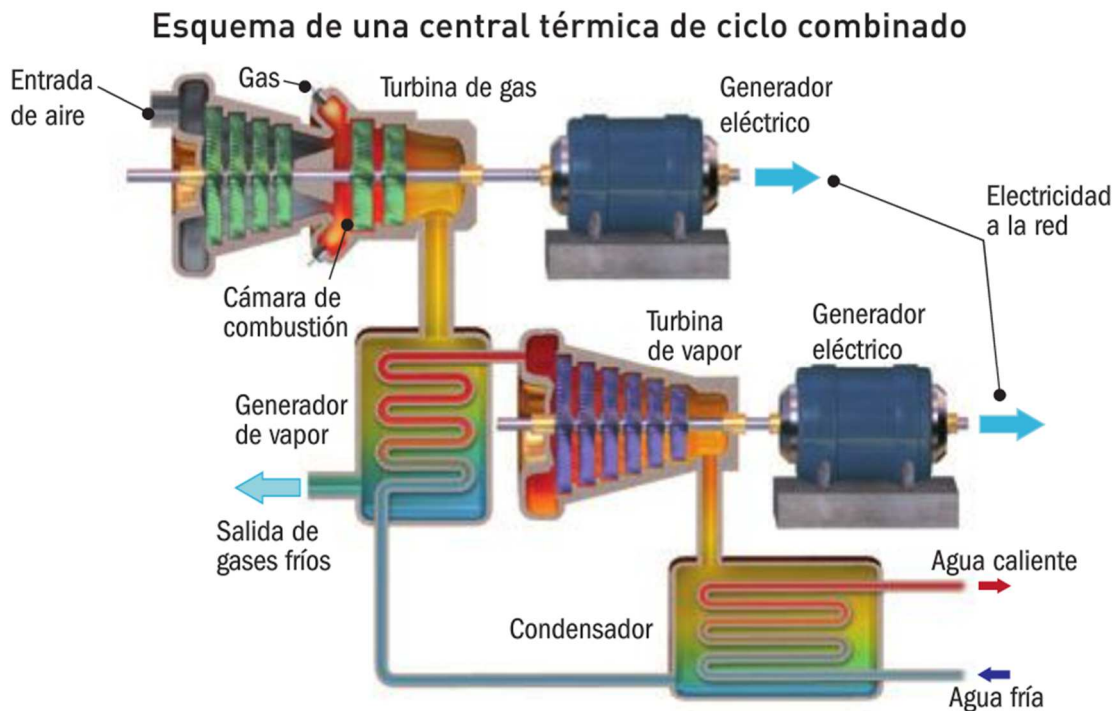
De acuerdo con la gráfica se puede afirmar que la mayoría de las emisiones corresponden a CO<sub>2</sub> con un 90%. Mientras que el segundo elemento más producido es metano con un 9% y el tercero pertenece a un 1% de óxido nítrico. También se puede deducir que más de la mitad de las emisiones se producen debido a la generación de energía, la cual proviene principalmente de fuentes fósiles como es el gas natural.

Se estima que en España el 25% de la energía generada proviene de las centrales de gas natural, y es por ello que se están dedicando muchos esfuerzos a estudiar y diseñar diferentes métodos mediante los cuales se reduzcan las emisiones de estas centrales. En el punto 1.3 se explicará uno de estos métodos (CLC), el cual se va a comparar como ya se ha dicho con un método convencional.

## 1.2\_ CENTRALES DE CICLO COMBINADO CON COMBUSTION DE GAS NATURAL

El gas natural es una de las fuentes de energía más utilizada en España y la forma más común de producir energía a partir de este recurso, es mediante las centrales de ciclo combinado. Este tipo de centrales se caracterizan porque tienen dos turbinas distintas, las cuales generan electricidad al mismo tiempo.

En la Figura 4 podemos ver un esquema el cual nos ayuda a diferenciar las distintas partes de la central y a explicar la función de cada una.



**Figura 4.** Esquema de una central de ciclo combinado. (Landin, 2012)

La primera parte, que se acciona para comenzar el ciclo combinado, es la zona que aparece representada en la esquina superior izquierda. En esta parte se puede ver la cámara de combustión. En ella entra por un lado el gas natural y por otro el aire para poder realizar la combustión. Los gases de salida producto de esta combustión se expanden en una turbina para producir energía. Esta energía se traslada al generador mediante el eje que atraviesa la cámara de combustión. Y por último en el generador se convierte en la electricidad que consumimos.

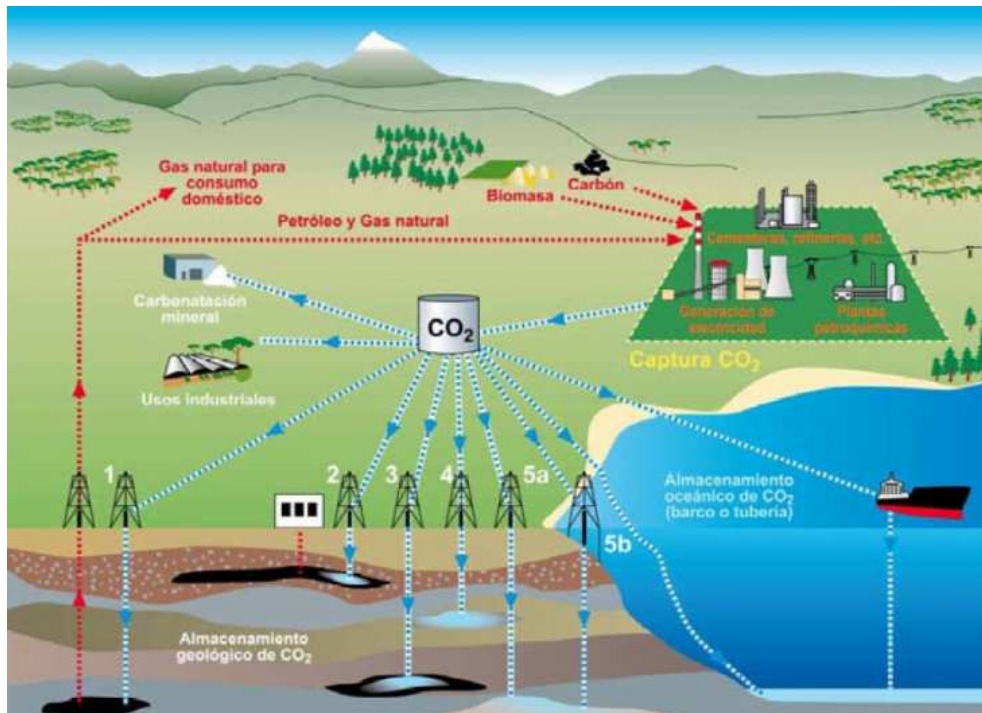
Por otro lado, de la cámara de combustión salen los gases producidos por dicha combustión a la zona conocida como generador de vapor. En el generador de vapor se enfrían los gases que salen de la combustión, cediendo su calor a un circuito, el cual posee agua que se renueva constantemente. El agua cambia de estado y se convierte en vapor debido a las altas presiones y temperaturas que alcanza e impulsa la segunda turbina. Una vez que se mueve la turbina la energía producida pasa al generador por medio de un eje, al igual que con la turbina de gas. Por último, en este segundo generador, al igual que el en el anterior, se produce electricidad.

### 1.3- TECNOLOGÍAS DE CAPTURA, TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE CO<sub>2</sub>

Para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial y poder alcanzar los objetivos fijados el acuerdo de París (2015). En este acuerdo se propone evitar que la temperatura media global supere en 2 °C respecto de los niveles preindustriales y promover esfuerzos adicionales que limiten el aumento a 1.5 °C. Una de las

posibilidades para limitar las emisiones de CO<sub>2</sub> es el uso de tecnologías que capturan, transportan y almacenan el CO<sub>2</sub> y se conocen como C.C.S. (Carbon capture and Storage Technologies).

A continuación, en la Figura 5 se presenta un esquema con el cual se va a explicar en qué consisten y cómo son las distintas fases del proceso de captura de CO<sub>2</sub>.



**Figura 5.** Diagrama del proceso de captura, transporte y almacenamiento de carbono. (IPCC, 2005)

En la Figura 5 se muestran las tres fases del proceso de captura, transporte y almacenamiento de carbono: la captura para separar el CO<sub>2</sub> del resto de productos gaseosos de la combustión, el transporte del CO<sub>2</sub> captado hacia un lugar de almacenamiento apropiado y el almacenamiento final, principalmente mediante la inyección en formaciones geológicas subterráneas.

Las tecnologías de captura permiten obtener corrientes concentradas de CO<sub>2</sub> en grandes fuentes de emisión estacionarias como pueden ser las grandes centrales de generación de energía que utilizan combustibles fósiles, las refinерías y las instalaciones de producción de hidrógeno.

Para realizar la captura del CO<sub>2</sub>, se han propuesto tres métodos distintos para las centrales de producción de energía (Figura 6). En los siguientes puntos se explicaran y detallaran cada uno.

- Tecnologías de postcombustión: este tipo de sistemas separan el CO<sub>2</sub> del resto de los gases producidos en la combustión del combustible con aire. El CO<sub>2</sub> se encuentra muy diluido, lo que dificulta su separación. A pesar de esto, esta tecnología ya existe actualmente a nivel comercial y ha sido demostrada en plantas existentes. Para el proceso de captura

hay varias posibilidades dentro de las cuales, la más utilizada actualmente es la absorción química con aminas. La inclusión del proceso de captura de CO<sub>2</sub> en postcombustión lleva asociadas penalizaciones sobre la eficacia energética del proceso global que pueden llegar hasta el 10%.

- Tecnologías de precombustión: El combustible se procesa inicialmente con O<sub>2</sub> y/o vapor de agua en un gasificador para obtener gas de síntesis (CO + H<sub>2</sub>). Mediante la reacción de intercambio (Water Gas Shift) con vapor de agua en un segundo reactor, se produce H<sub>2</sub> adicional y CO<sub>2</sub>. La mezcla de gases obtenida puede separarse de un modo más sencillo que en el caso anterior debido a que la concentración del CO<sub>2</sub> es mayor (15- 60%) y la alta presión (10-40 atmósferas) a la que se encuentran este tipo de sistemas. En este caso, las penalizaciones energéticas asociadas al proceso de captura se encuentran alrededor de 7.5%.

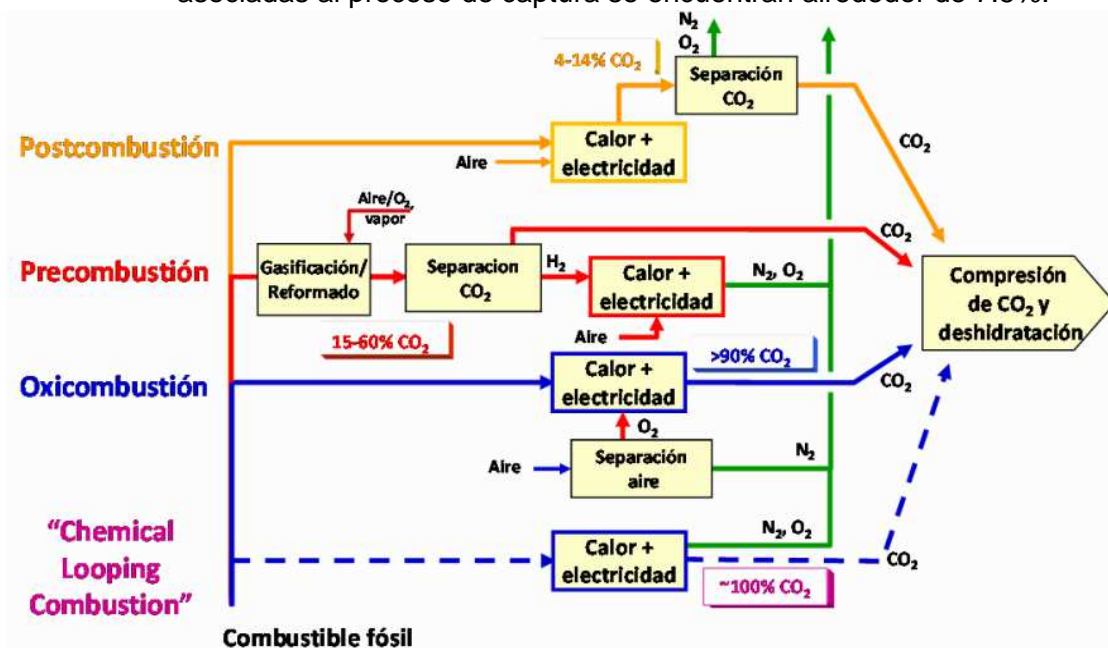


Figura 6. Esquema de las tecnologías de captura de CO<sub>2</sub>. IPCC (2005)

- Oxidación o Combustión sin N<sub>2</sub>: Dado que el principal coste de la captura del CO<sub>2</sub> radica en la separación de este gas de los humos de la combustión, donde se encuentra muy diluido, una opción sencilla que se plantea para reducir costes consiste en realizar la combustión en una atmósfera sin N<sub>2</sub>. Estos sistemas utilizan oxígeno en lugar de aire para la combustión del combustible con el fin de obtener un gas compuesto fundamentalmente de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. De este modo se consigue un gas de salida con una concentración de CO<sub>2</sub> superior al 80%. El vapor de agua puede eliminarse mediante el enfriamiento y la compresión de la corriente gaseosa. El principal inconveniente es que la separación del O<sub>2</sub> del aire es un proceso muy costoso y con altas penalizaciones energéticas. La penalización energética en los sistemas de oxidación oscila entre 6-12%.

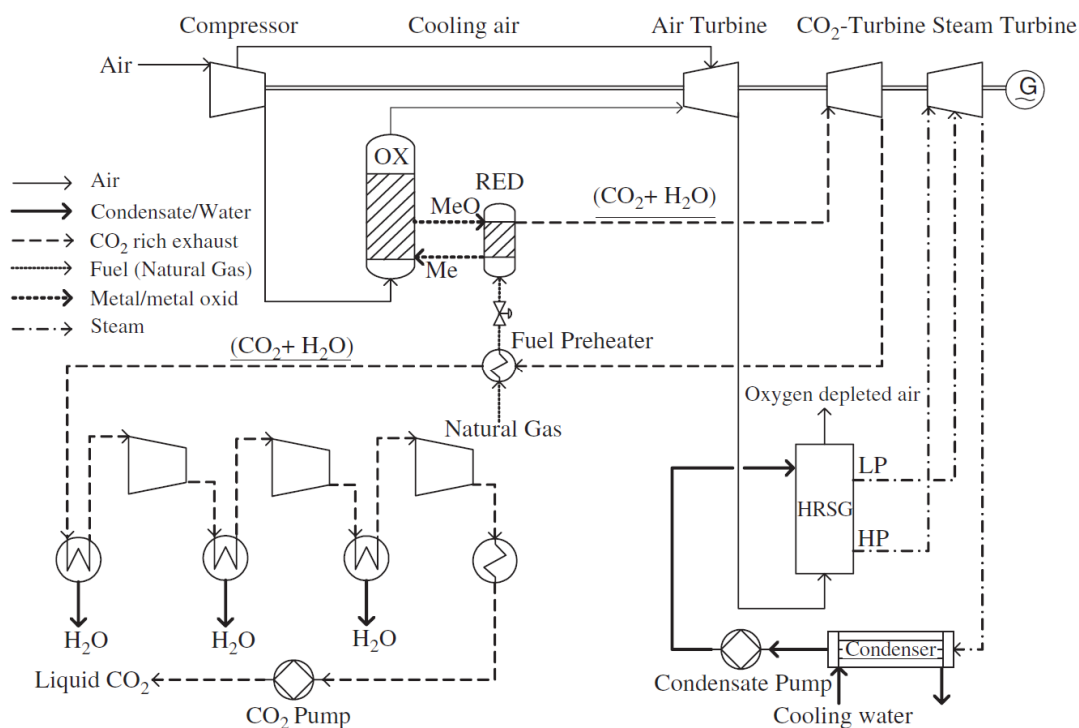


### 1.4\_ CHEMICAL LOOPING COMBUSTION (CLC)

La tecnología de combustión con transportadores sólidos de oxígeno (CLC) está dentro de las tecnologías de oxicomcombustión o combustión sin N<sub>2</sub>.

Para ello, el oxígeno entra en la cámara de combustión mediante un transportador que tiene la capacidad de oxidarse con bastante velocidad. En nuestro caso el transportador es nitrato de Níquel el cual tiene una alta facilidad a oxidarse.

A continuación en la Figura 7 se muestra un esquema de una central de CLC en el cual podemos apreciar las diferentes partes que la componen.



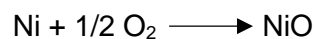
**Figura 7.** Esquema de una central CLC (Naqvi, Wolf, & Bolland, 2005).

Como se puede ver en la figura anterior la parte de la generación de energía y electricidad es idéntica a la convencional. De manera que tenemos dos turbinas las cuales funcionan con gas y vapor de agua. En este caso también existe una nueva turbina la cual es de alta y de baja presión. Esta parte junto con la que aparece en e la esquina inferior derecha también se puede añadir en el caso de la otra central. También podemos observar en este caso se utiliza un único generador que como ya se ha comentado transforma la energía mecánica producida en las turbinas en electricidad.

La combustión con transportadores sólidos de oxígeno (CLC) permite alcanzar una concentración elevada de CO<sub>2</sub> en los gases de combustión. De esta manera, tras la condensación del vapor de agua, se obtiene una corriente prácticamente pura el dióxido de carbono. Esto aparece representado en la Figura 7 en la esquina inferior

izquierda con tres condensadores de los cuales sale agua y del último sale agua por un lado y CO<sub>2</sub> por otro. Con el CO<sub>2</sub> capturado se lleva a cabo lo que se denomina almacenamiento geológico, que consiste en enterrar el gas bajo tierra como por ejemplo en pozos de petróleo agotados.

El sistema de combustión CLC está formado por dos reactores. En la parte izquierda está el reactor de Oxidación; esta cámara un tiene una entrada por la cual se introduce el transportador sin oxígeno, una vez que ha salido de la combustión. Por otro lado, se suministra el aire de atmosfera y entonces se crea la reacción en la que el transportador de níquel se oxida. La reacción que se produce en el transportador es la siguiente.



De esta cámara sale aire empobrecido de oxígeno que se libera a la atmósfera y por otra salida se conduce el transportador oxidado (NiO) que se ha producido en dirección al reactor de reducción.

En este segundo reactor se produce la combustión y se le asigna el nombre de reductor porque una de las reacciones que ocurre es que el transportador se reduce de NiO a únicamente Ni.

La reacción completa que se produce de es la siguiente.



Como se puede ver, los flujos de alimentación de este reactor son el fuel, el transportador proveniente de la cámara de oxidación y un flujo de transportador virgen que compensa el elutriado, es decir, el perdido a lo largo de la circulación del transportador entre los dos reactores.

## 1.5. MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL TRANSPORTADOR DE OXÍGENO

Como ya se ha podido deducir en los apartados anteriores, el transportador de oxígeno es la parte fundamental de la tecnología CLC. Para ello, este sólido debe poseer diferentes características las cuales se tienen que conservar durante un número de ciclos.

El transportador está constituido por una fase activa y un soporte. Como fases activas se suelen utilizar óxidos de metales de transición. El óxido de níquel (NiO) es el que vamos a simular en nuestro estudio, pero también pueden ser otros como CuO, CoO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Por otro lado, el soporte tiene como función actuar como material poroso y dotar al transportador con resistencia mecánica y a la atrición. Algunos de los soportes más utilizados son TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> estabilizado con itrio, NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y el que vamos a utilizar nosotros en la simulación que es Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

La capacidad de transporte de oxígeno del transportador (R<sub>OC</sub>) es un parámetro importante en el proceso CLC puesto que, al aumentar su valor, más oxígeno está disponible para la reacción de reducción. R<sub>OC</sub> se define como la masa de oxígeno que

es capaz de transferir el transportador por unidad de masa, calculada mediante la siguiente ecuación:

$$R_{Oc} = \frac{\text{masa de oxígeno transferible}}{\text{masa de transportador}} = \frac{m_{ox} - m_{red}}{m_{ox}}$$

Donde  $m_{ox}$  es la masa del transportador de oxígeno completamente oxidado y  $m_{red}$  representa la masa del transportador de oxígeno en su forma reducida.

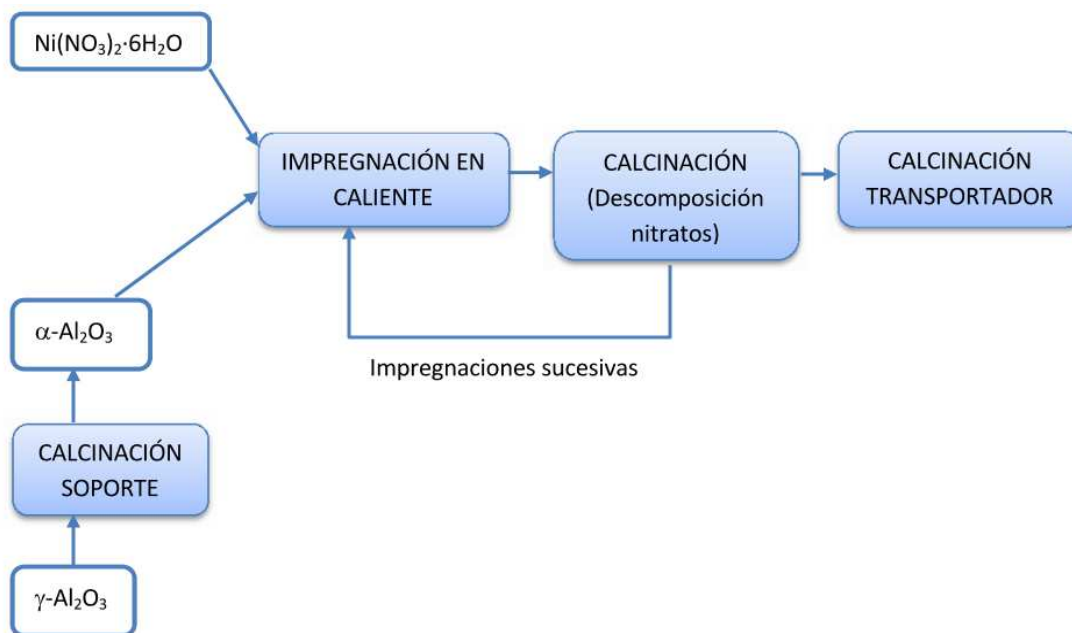
La preparación del transportador de oxígeno requiere la elección del método de producción de transportador. Esta decisión, va a ser determinante para sus propiedades posteriores de dispersión de la fase metálica, la interacción metal-soporte o la resistencia mecánica de las partículas. Además de en estos aspectos, dicha elección influirá también en nuestro análisis.

En este trabajo se ha seleccionado como transportador de oxígeno un transportador basado en NiO. Debido a su mayor reactividad y estabilidad térmica, los transportadores de oxígeno de base níquel han sido ampliamente utilizados en la combustión de combustibles gaseosos. También, el óxido de níquel (NiO) tiene una alta capacidad de transporte de oxígeno.

El óxido de níquel se soporta sobre  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Para obtenerla se partió de  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  comercial (Puralox NWA-155, Sasol Germany GMBH). Cuando la alúmina comercial se calcina a 1423 K durante 2 horas, se produce el cambio de fase de  $\gamma$ - a  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . El uso de la fase  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  en lugar de la fase comercial es debido a que así se minimiza la interacción entre la fase activa y el soporte para formar  $\text{NiAl}_2\text{O}_4$ . El aluminato de níquel es menos reactivo que el óxido de níquel por lo que conviene mantener una elevada proporción de NiO frente aluminato de níquel.

El método utilizado para preparar el transportador se conoce como método de impregnación con humedad incipiente en caliente. En la siguiente figura se puede ver un esquema en el que se representa dicho método (Figura 8).





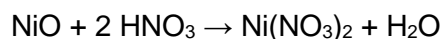
**Figura 8.** Esquema de la producción de transportador. ((ICB-CSIC), 2016)

Este proceso consiste en añadir al soporte un volumen de una disolución saturada 4.2M de Ni (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 6H<sub>2</sub>O (>99.5%, Panreac) correspondiente al volumen total de poros de las partículas de alúmina. El soporte se mantiene caliente a 353 K, mientras la disolución de nitrato se calienta hasta 333 – 353 K. De este modo se favorece la solubilidad del Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y por tanto la cantidad de níquel depositado en cada impregnación.

La carga deseada de fase activa se consigue mediante la aplicación de impregnaciones sucesivas, seguidas de calcinación a 823 K en una atmósfera de aire durante 30 minutos. Esta calcinación es necesaria para descomponer los nitratos impregnados.

Finalmente, los transportadores de oxígeno se calcinan en una mufla a 1223 K durante una hora. El resultado que obtenemos tras este proceso y aplicándole dos impregnaciones, es un transportador con composición de 18 % en peso de NiO sobre α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y con una densidad de 2.5 g/cm<sup>3</sup>.

Con respecto a la recuperación del transportador elutriado se ha considerado que se recupera con HNO<sub>3</sub> siguiendo la fórmula:



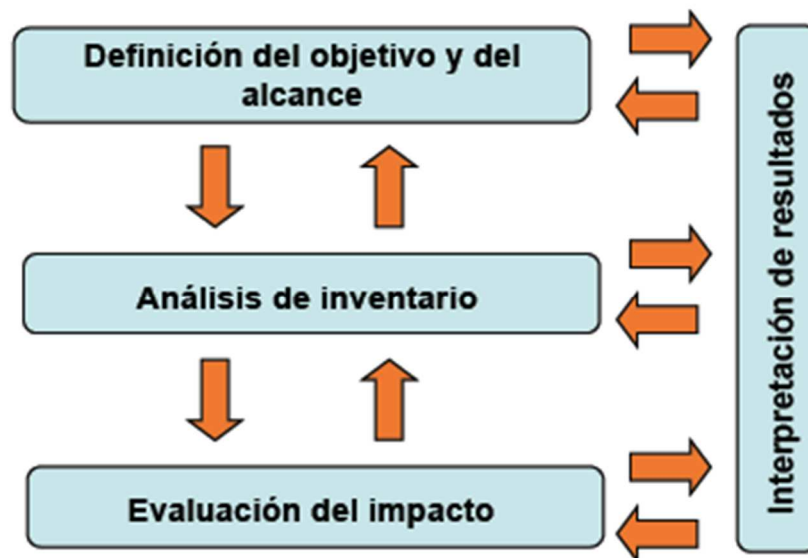
es decir, que se necesitan dos moles de ácido nítrico por mol de NiO contenido en el transportador. En este trabajo se van a considerar tres escenarios, el primero en el cual se recupera el 100 % del NiO que se pierde por elutriación, y un segundo y tercero escenarios en los que se recupera el 90 % y el 75 %, respectivamente. En pruebas realizadas con anterioridad a transportadores con cobre se ha demostrado que estos sólidos cumplen con los límites legales de metales en lixiviados y pueden ser tratados como inertes en los vertederos (Francisco García-Labiano, 2007). Estas pruebas no se han realizado con transportadores de níquel, y aunque cabría esperar

un comportamiento similar, todavía queda por demostrar. Es por ello que la consideración de estos sólidos como inertes , tal y como se ha hecho en este trabajo, es una hipótesis que debería ser corroborada en trabajos futuros. El níquel es un metal pesado cancerígeno con graves efectos sobre los seres vivos, y por ello los lixiviados de vertederos deben cumplir estrictos límites legales de concentraciones en metales pesados (Real Decreto 1481/2001, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, y Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, sobre Residuos Peligrosos).

### 1.6\_ ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El análisis de ciclo de vida es una herramienta para evaluar los daños que realiza cualquier actividad sobre el medio ambiente. Esta herramienta tiene un procedimiento que se divide en cuatro fases las cuales seguiremos a la hora de evaluar los métodos de generación de energía ya comentados.

A continuación podemos ver un esquema que nos resume claramente como debe ser el método de aplicación del análisis de ciclo de vida (Figura 9).



**Figura 9.** Esquema de las fases del ACV

Como se puede ver en el esquema es un sistema cíclico en el cual, las fases tienen que estar continuamente interactuando unas con otras.

La primera fase consta de definir la unidad funcional. Para ello es necesario saber qué es lo que se va a evaluar y marcar un espacio temporal durante el cual se va hacer la evaluación. También es necesario definir los límites y el alcance del

estudio y por eso la unidad funcional delimitará hasta donde queremos llegar. Por ejemplo si deseamos realizar un estudio sobre los impactos que proporciona cualquier tipo de envase, es fundamental definir desde el primer momento qué volumen va a contener, para qué producto es, y qué tiempo de uso va a tener.

Proseguiremos con la fase de análisis del inventariado. Para ello se crea un inventario para cada proceso unitario que tiene que quedar dentro de los límites del sistema. Por lo general la mayoría de datos que se recolectan en este apartado son entradas de energía, materias primas, productos o co-productos y salidas de estos mismos, más residuos o emisiones. Con este paso se pretende obtener datos y procedimientos los cuales nos ayuden a calcular, identificar y cuantificar los aspectos ambientales adversos.

El tercer paso para realizar el análisis de ciclo de vida es la transformación de datos. En este apartado se calcula con los datos escogidos en el análisis del inventariado los impactos que va a tener el proceso que vamos a estudiar. En nuestro caso, como se amplía más adelante, se va a realizar una simulación en un software llamado Gabi de las distintas centrales. Aparte de calcular, también se debe escoger los indicadores y que niveles de confianza podemos tener en cada indicador. Es importante que los indicadores nos ayudaran a evaluar y cuantificar los impactos de cada proceso con las mismas unidades para que podamos compararlos. Para nuestro estudio utilizaremos 13 indicadores que se explicarán en el punto 2.3.

Por último, se presentan los resultados para poder analizarlos y comentarlos. De esta manera podremos extraer unas conclusiones, como por ejemplo, indicar qué proceso es más perjudicial para el medio ambiente en el caso de comparar dos métodos de trabajo.

## 1.7\_ OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es comparar los impactos ambientales de la producción de electricidad mediante una central eléctrica de ciclo combinado con gas natural y otra central que utiliza la tecnología de transportadores de oxígeno.

Mediante este estudio se podrá demostrar si las centrales basadas en el proceso CLC son realmente menos contaminantes que las convencionales, ya que se va a tener en cuenta todos los procesos de fabricación de los elementos necesarios para realizar el transporte de oxígeno.

Para ello utilizaremos la herramienta de análisis de ciclo de vida que nos ayudara a valorar los impactos de cada central para la misma producción de MW durante el mismo periodo de tiempo.

## 2\_ ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

El análisis de ciclo de vida es un método que utilizamos para determinar los diferentes impactos que tiene cada proceso según una serie de indicadores. Se encarga de

evaluar todos los procesos que conlleva generar en nuestro caso la energía eléctrica desde la extracción del combustible, pasando por su transporte hasta la combustión del mismo.

En nuestro caso se va a utilizar para comparar dos centrales de las cuales tendremos que definir la unidad funcional, haremos un análisis del inventariado, la transformación de datos para presentarlos de manera que sea más legible y por último comentaremos los resultados.

En los puntos que vienen a continuación veremos las fases comentadas de manera desarrollada.

## 2.1\_ DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y DEL ALCANCE

La unidad funcional es uno de los aspectos más importantes del análisis de ciclo de vida y es lo primero que hay que definir. En nuestro caso se trata de hacer una comparación entre dos centrales eléctricas y el tiempo que se ha estimado de vida ha sido de 25 años. Durante este periodo de tiempo las dos centrales han de generar la misma cantidad de MW por lo que se ha decidido que cada una produzcan 500 MW eléctricos. Así pues, definiremos los límites de nuestro estudio a un tiempo de 25 años con una potencia de 500 MW<sub>e</sub>.

El motivo de tomar esta decisión es que creemos que así podemos evaluar las distintas centrales durante un periodo de tiempo en el cual pueden tener paradas y arranques. Por este motivo las horas trabajadas anualmente se han decidido que sean 8000 h/año. Para el caso de la potencia se ha decidido así porque es una potencia media de lo que producen las centrales instaladas en España. Los límites geográficos del estudio se establecen en España, por lo que se contabilizarán los impactos de transporte del fuel desde el punto de extracción hasta el de uso.

## 2.2\_ ANÁLISIS DEL INVENTIARADO

El análisis del inventariado consiste en la recopilación de la información necesaria para hacer los cálculos. En este caso, como el estudio es conjunto con el Instituto de Carboquímica de Zaragoza (ICB-CSIC), se ha de mencionar que estos nos han facilitado gran parte de los datos necesarios.

Para explicar de manera más concreta cómo hemos realizado este punto, a continuación hemos descrito la forma en que se ha recaudado información y por qué se usa dicha información para cada proceso.

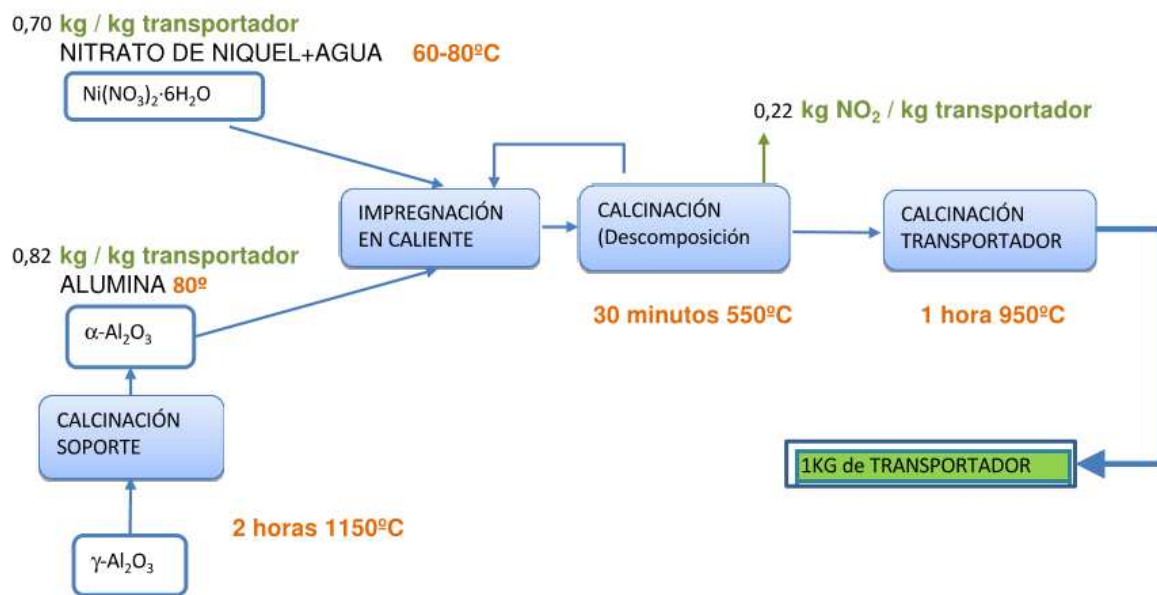
### 2.2.1\_ CLC

En el caso del CLC nos han facilitado la mayoría de la información el Instituto Carboquímica (ICB-CSIC) de Zaragoza. Por un lado vamos a recopilar la información para saber cómo podemos fabricar el transportador de oxígeno basado en nitrato de níquel y por otro lado debemos investigar cómo funciona una central CLC además de saber su rendimiento y la eficiencia de la combustión.

*2.2.1.1. Transportador de oxígeno*

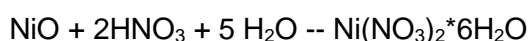
El instituto de Carboquímica (ICB-CSIC) de Zaragoza nos facilitó el siguiente esquema en el que se pueden apreciar las fases y cantidades necesarias de materias primas para fabricar un kilogramo de transportador de níquel.

Como se puede ver a continuación (Figura 10) se vuelve a presentar el esquema mostrado en la Figura 8 pero en este caso está más detallado ya que tiene las cantidades necesarias de cada producto, así como tiempos y temperaturas de los procesos.



**Figura 10.** Esquema de fabricación de transportador. ((ICB-CSIC), 2016)

Como se puede ver en la Figura, para la producción de 1 kg de transportador son necesarios 0.7 kg de nitrato de níquel hidratado y 0.82 kg de alúmina. Para la simulación del proceso de fabricación de alúmina se han tomado datos de bibliografía (Gloria, 2013). Para la simulación de fabricación de Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O ha sido necesario simular su síntesis a partir de óxido de níquel y ácido nítrico:



Esta reacción es exotérmica por lo que no se ha considerado un uso de energía para su síntesis. GaBi posee en su base de datos la simulación de la síntesis

de ácido nítrico, pero no de NiO, por lo que, de nuevo, para su simulación se han utilizado datos de bibliografía (Jin, 2014). Para la simulación de los procesos de calcinación se considera que se ha utilizado un horno de potencia 1.2 kW y suficiente volumen interno para el tratamiento de los sólidos.

### 2.2.1.2. Proceso global de CLC

Por otro lado, como se ha comentado al inicio de este apartado, la otra parte de la que necesitamos información es de la central de CLC. Para ello el Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC) nos ha facilitado la información. Como se ha dicho a la hora de escoger la unidad funcional, la potencia eléctrica de la instalación es de 500 MW<sub>e</sub>. El rendimiento de la central puede llegar a alcanzar hasta 52.2 % como aparece en bibliografía (Naqvi, Wolf, & Bolland, 2005). Estos datos se utilizan para sacar la cantidad de Megavatios térmicos necesarios, 958 MW<sub>t</sub>.

Si se considera que la eficiencia de la combustión es del 90 %, y sabiendo que el poder calorífico del gas natural de 50143 kJ/kg, podemos obtener la cantidad de gas natural que consume. (76410,2 kg/hora). Este dato multiplicado por las 8.000 horas cada año por los 25 años nos da la cantidad de fuel que se necesita, es decir 1,53E+07 kg de gas natural.

Una vez que tenemos la cantidad de combustible calculada podemos obtener el aire que se utiliza para la combustión. Para ello, tenemos que tener en cuenta el exceso de oxígeno (20%) que se da en la cámara de combustión y la composición del fuel utilizado. El gas natural, principalmente CH<sub>4</sub>, contiene un 75% de carbono y un 25% de hidrógeno y sus masas atómicas son de 12 y 1 (g/mol) respectivamente. Con esto, y poniendo la condición de gas ideal por la cual sabemos que 1 mol de gas es 22,4 L, calculamos el oxígeno estequiométrico de la siguiente forma.

$$\left( \frac{\%C}{M.A. C} + \frac{\%H}{4 \times M.A. H} \right) \times 22,4 = \left( \frac{0,75}{12} + \frac{0,25}{4 \times 1} \right) \times 22,4$$

Este cálculo nos da un resultado de 2,80 L/g o m<sup>3</sup>/kg. Ahora a este resultado se le debe añadir la cantidad de oxígeno en exceso que tiene que haber por lo que se tiene que multiplicar por 1,2. El resultado es de 3,36 L/g, y como el aire está compuesto por un 21% de oxígeno, se necesitarán 16 L de aire por cada gramo de CH<sub>4</sub>.

Los cálculos anteriores son necesarios para conocer la cantidad de transportador que vamos a utilizar. Hay que resaltar que el sistema parte inicialmente con un carga de transportador de 600 kg y que la velocidad de atrición es de 0,01 %/h, es decir, que se pierde el 1 % del transportador por hora. Este dato es muy interesante ya que es a partir del cual podemos obtener cuánto transportador debemos reponer cada hora operando con la siguiente fórmula.

$$\left( \frac{(\text{kg transportador en el sistema}) \times (\text{Velocidad atricción})}{100 \times \text{Potencia de la instalación (MWth)}} \right)$$

El resultado de la fórmula anterior 57,47 kg/h por lo tanto esta será la cantidad que se debe reponer cada hora. Sabiendo este dato y la cantidad inicial de transportador que necesita la central en el arranque, podemos obtener la cantidad total de transportador que vamos a necesitar durante los veinticinco años. El resultado es de 1,15E+07 kg de transportador que vamos a tener que fabricar para mantener la central funcionando. Este dato lo utilizaremos a la hora de simular la fabricación del transportador.

Por otro lado, hay que resaltar que se ha considerado que el transportador elutriado puede ser recuperado y regenerado para volverlo a utilizar en el proceso de generación de energía. El proceso de regeneración consiste en la recuperación del óxido de níquel mediante ácido nítrico para volver a obtener nitrato de níquel que se vuelve a impregnar sobre alúmina virgen. La alúmina desechada del transportador elutriado se envía a un vertedero.

En la Tabla siguiente se muestran las entradas y salidas para la producción de 500 MW<sub>e</sub> durante 25 años de la planta de CLC en el caso de que se considere que el transportador elutriado puede ser regenerado sin pérdidas de óxido de níquel:

Fuel (kg)	1,53E+07
NiO (kg)	820
HNO <sub>3</sub> (kg)	3,49E+06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (kg)	9,43E+06
Aire (kg)	3,14E+11
Electricidad Mufla (kWh)	1,38E+4
Alumina a vertedero	1,07 e+7

**Tabla 1.** Entradas y salidas de la central de CLC

Se considera que el Fuel es extraído y transportado por viaductos desde Argelia a España. Para la simulación de la combustión de este Gas Natural en el caso de la planta de CLC no se ha considerado que se emitan gases efecto invernadero ni derivados del azufre o del nitrógeno.

### 2.2.2\_ CONVENCIONAL

En este caso se dispone en la base de datos de GaBi de un proceso de obtención de energía térmica a partir de la combustión de Gas Natural para el caso de España. En este caso, por tanto, sí que se van a considerar las emisiones de gases efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> o el CH<sub>4</sub>, además de óxidos de nitrógeno y de azufre que se puedan emitir en estas centrales.



La eficiencia de la combustión en este tipo de centrales es del 99 % y el rendimiento de la central que es de 55.6%. Son valores más altos que para el caso del CLC debido a que al entrar el oxígeno en contacto con un sólido, la combustión es menos eficiente, para el primer valor, y a que en el proceso convencional, se pueden conseguir presiones y temperaturas mayores, para el caso del segundo valor.

### 2.3\_ EVALUACIÓN DEL IMPACTO

La transformación de datos a los indicadores ambientales, se ha realizado siguiendo las indicaciones de la Comisión Europea (ILCD, Joint Research Centre). Los indicadores se clasifican de dos maneras, según el tipo de peligro y contaminación. Estos son valores que ya se conocen y se diferencian entre trece peligros diferentes. Otro modo de clasificarlos es según el nivel de confianza que podemos tener en cada uno, ya que algunos son más fiables que otros. Estos niveles pueden ser I, II, II/III o III, siendo el de nivel I el más seguro. Del primer nivel existen tres indicadores, del segundo nivel tenemos seis indicadores, del tercero hay tres indicadores y del cuarto nivel, aunque existen más, solo hemos utilizado uno ya que es el nivel en el que menor confianza podemos depositar.

A continuación, se va a presentar los indicadores en una tabla con la nomenclatura que se utiliza para identificarlos y su traducción en castellano, después se explicaran de forma individual qué indica cada uno.

NIVEL	SIGLAS	INDICA	
I	GWP	Climate change	Cambio Climático
I	ODP	Ozone depletion	Agotamiento de la Capa de Ozono
I	PMR	Particulate matter/Respiratory inorganics	Particular Inorgánicas que afectan la Respiración
II	POF	Photochemical ozone formation	Formación de Ozono Fotoquímico
II	AC	Acidification	Acidificación
II	EUT	Eutrophication, terrestrial	Eutrofización del Terreno
II	EUW	Eutrophication, aquatic	Eutrofización del Agua
II	RDPF	Resource depletion, mineral, fossil and renewable	Desgaste de Recursos Minerales Fósiles o Renovables
II	IRH	Ionising radiation, human health	Radiación Iónica
II/III	ECFW	Ecotoxicity Freshwater	Eco-toxicidad del Agua Virgen
II/III	HTNC	Human toxicity, non- cancer effects	Toxicidad para el ser Humano no Cancerígena
II/III	HTC	Human toxicity, cancer effects	Toxicidad para el ser Humano Cancerígena
III	RDW	Resource depletion, water	Desgaste de Agua

**Tabla 2.** Indicadores medioambientales según el ILCD.



Como se puede ver en la Tabla 2, los indicadores están ordenados de mayor nivel de confianza a menor. En la columna de la izquierda se presenta el nivel al que pertenece cada indicador. Una vez mostrada la tabla, se va a desarrollar brevemente cada indicador en los siguientes puntos según el nivel que le corresponde.

### 2.3.1\_ INDICADORES DE NIVEL I

Los indicadores de este nivel son en los que más confianza podemos depositar ya que son los más fiables. El GWC es uno de los tres indicadores de los que más confianza podemos depositar porque es de nivel I. Se basa mayormente en las emisiones de gases efecto invernadero que va a producir nuestro proceso y como resultado nos da el impacto que tienen estas emisiones. La unidad en el que se mide es en Kg de CO<sub>2</sub> equivalentes.

Otro indicador que es fiable es el ODP que tiene que ver con la destrucción de la capa de ozono. Se mide en Kg de CFC-11, que son derivados de hidrocarburos saturados. El último indicador de este nivel es el PMR, que se refiere a las partículas que se quedan en suspensión en el aire y son dañinas para el ser humano a la hora de respirarlas. Pueden ser líquidas o sólidas de polvo, hollín, metal, cemento o polen. La unidad en la que se miden son kg de PM-2,5 que se refieren a las partículas de este tipo menores de 2,5 micras.

### 2.3.2\_ INDICADORES DE NIVEL II

Como ya hemos visto en la tabla, los indicadores de nivel II son los más abundantes ya que existen seis tipos distintos para este nivel. Son los segundos indicadores más fiables por lo que también los tendremos bastante en cuenta.

El POF es el indicador que se refiere a la formación de ozono fotoquímico. Otro nombre que recibe este tipo de contaminación es smog fotoquímico que se suele observar en las grandes ciudades creando una atmósfera con color plomo o negro. La unidad en la que se mide es en kg de NMVOC que son todos los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano.

Continuamos con el indicador AC que trata la acidificación del terreno. En realidad la acidificación preocupa especialmente en las aguas tanto dulces como saladas, pero con este método se mide en el terreno ya que a partir de él se puede predecir qué pasará en las aguas. La unidad en que se mide es Moles de H<sup>+</sup> equivalentes.

Otro indicador de nivel II es el EUT que mide la eutrofización de la tierra. Trata de evaluar la cantidad de sustancias que enriquecen el terreno con nutrientes nitrogenados y fosfatados. La unidad en que se cuantifica este indicador es en Moles de N equivalentes.

También tenemos otro indicador que al igual que el anterior mide la eutrofización pero en este caso la que se da en el agua. Para medir este indicador, se utiliza los kg de P equivalente.

El RDPF es el indicador que nos informa de los desgastes que sufren los recursos fósiles, minerales y renovables que nos ofrece la naturaleza. Se mide en kg de Sb (Antimonio) equivalente.

Por último para concluir con los indicadores de nivel II tenemos el IRH que nos cuantifica la radiación iónica. Este factor incide en la liberación rutinaria de material radiactivo al medioambiente que pueden producir daños a la salud humana. Se mide en kg de U235 equivalente que es un isótopo del uranio que provoca una reacción en cadena de fisión que se expande rápidamente.

### 2.3.2\_ INDICADORES DE NIVEL II / III

Para el nivel II/III, tenemos tres indicadores los cuales vamos a describir a continuación. El ECFW es el indicador que nos informará sobre la cantidad de sustancias que son tóxicas para el agua y emite nuestro proceso. Se miden CTUe que es una unidad con la que se compara la toxicidad que afecta a los ecosistemas.

Los dos siguientes indicadores son muy parecidos ya que los dos estudian las sustancias tóxicas para el ser humano. La diferencia está en que el HTNC indica el nivel de emisiones que son tóxicas para el ser humano pero no son cancerígenas. Mientras que el HTC estudia las sustancias que emite nuestro proceso que si son cancerígenas. La unidad con la que se miden ambos indicadores es CTUh. Esta unidad se utiliza para comparar la toxicidad que afecta a los seres humanos.

### 2.3.2\_ INDICADOR DE NIVEL III

Como ya se ha comentado, los indicadores que corresponde a este nivel son los menos fiables que tenemos, por ello se ha decidido utilizar solo uno. El único indicador de este nivel que vamos usar es el RDW que nos hará saber cuál es el desgaste de agua que produce nuestro proceso. Para cuantificarlo utilizaremos los  $m^3$  que son la unidad que nos recomienda la ILCD.

## 2.4\_ RESULTADOS

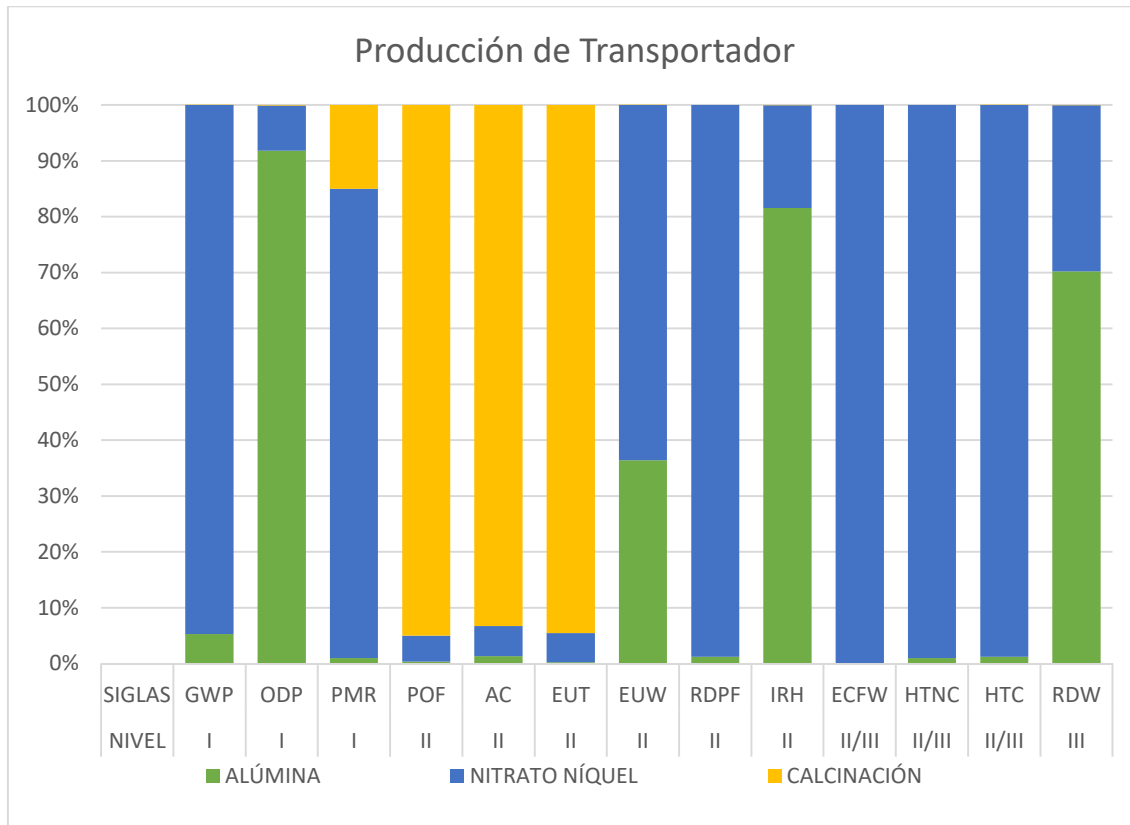
Una vez concluidos todos los pasos anteriores es hora de estudiar los resultados que hemos obtenido. A continuación se comentan todos los resultados obtenidos en el siguiente orden: primero se examinan los resultados de los impactos del ciclo de vida de un kilogramo de transportador para estudiar cuáles son los puntos más impactantes.

Posteriormente se va a estudiar el impacto de la central de generación de energía basada en la combustión CLC con diferentes porcentajes de recuperación de óxido de níquel (100, 90, y 75 %). Para finalizar, en el punto 2.4.3., se realizarán tres comparaciones. La primera será de la central de CLC con recuperación de NiO total con la central convencional. En el segundo caso se realizará la comparación entre la central de CLC con el caso más desfavorable de una recuperación del 75% de NiO frente a los resultados de la central convencional. De esta manera se podrá ver la importancia de la recuperación frente a la central que no utiliza la tecnología para capturar el CO<sub>2</sub>. La tercera y última comparación se hará entre las emisiones de CO<sub>2</sub> de cada central por kW producido.

#### 2.4.1. ACV de 1 kg de transportador de NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

El proceso del transportador es el que más ha costado conseguir información para elaborar la simulación ya que posee diferentes fases para fabricar cada elemento. Dichas frases se han dividido en tres. La primera es la producción de alúmina, la segunda es la producción del nitrato de níquel y la última es la calcinación. La fase de impregnación no se muestra ya que sus impactos son mínimos en comparación con el resto de procesos.

Estas fases se diferencian claramente, como se ve en la gráfica a continuación, en la que se representa la contribución de los procesos de síntesis de alúmina y nitrato de níquel, y el de calcinación, al valor global de cada uno de los indicadores (Figura 11).



**Figura 11.** Porcentaje de contribución de los procesos de síntesis de alúmina y nitrato de níquel, y de calcinación, al valor global de cada uno de los indicadores.

Vamos a ir explicando los indicadores de izquierda a derecha empezando por los indicadores de primer nivel y acabando por el del tercer nivel. Para el GWP (Global Warming Potential) se puede ver que el proceso que más influye es el de la producción de nitrato de níquel con un 94%, un 1% para la calcinación y el resto del indicador es para la producción de alúmina. Que la influencia del nitrato de níquel en este indicador sea tan grande es debido a que para producir esta sustancia se necesita óxido de níquel y a que su proceso de generación es el más contaminante en términos de cambio climático.

En el ODP (Ozone Depletion) pasa algo parecido pero a la inversa, en este caso es la producción de alúmina la que más abarca con un 90%. El 9% es para el nitrato de níquel y el 1% restante es para la calcinación.

Por último, para acabar con los indicadores de nivel I está el PMR (Particular Mater Respirator), que en este caso pasa al igual que en el primero y es el nitrato de níquel el que más impacta con un 80% de influencia, también debido a la fabricación de óxido de níquel. El 20% restante lo producen las emisiones de la calcinación.

Los tres indicadores siguientes, el POF (Photochemical Ozone Formation), AC (Acidification) y EUT (Eutrophication, terrestre) están casi completamente ocupados por la calcinación salvo un 5% que pertenece a la producción del nitrato de níquel. Que la calcinación obtenga unos valores tan altos es porque se generaran gases de dióxido de nitrógeno los cuales hacen disparar estos indicadores (0,22 kg NO<sub>2</sub> por kg de transportador, Figura 10).

Seguimos con el EUW (Eutrophication, aquatic) que se reparte bastante entre los dos procesos siguientes. Por un lado, la producción de nitrato de níquel tiene un 60% del indicador mientras que la de la alúmina un 40%. El primero, del 60% que le pertenece, un 30% es debido al óxido de níquel y el otro 30% es debido al ácido nítrico que se utiliza en el proceso. Como se puede ver en la Figura 11 la cantidad de esta sustancia es casi el doble que la de óxido de níquel y solo aparece en este indicador. Por su parte, el proceso dentro de la fabricación de alúmina que más impacta es la soda cáustica.

El valor del indicador que nos refleja la contaminación que afecta al desgaste de los recursos fósiles y minerales, RDPF (Resource depletion, mineral, fossil and renewable), en su totalidad es debido al el óxido de níquel, en concreto a la producción de nitrato de níquel. Es el único indicador que no se comparte parcialmente entre dos procesos y se debe a que la generación de dicha sustancia más que al proceso de extracción del níquel.

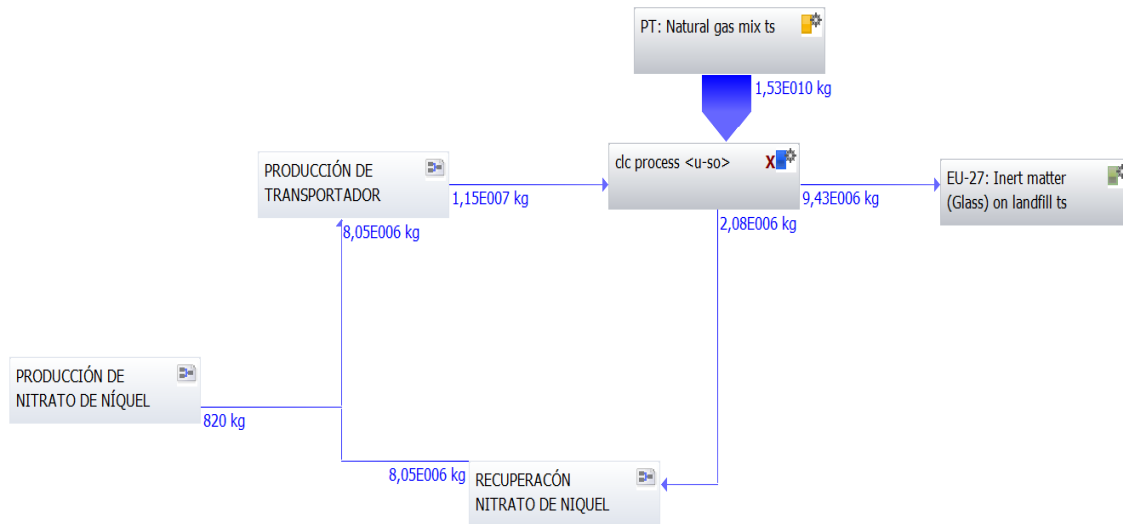
La radiación iónica, IRH, está dividido con un 15% para la producción de nitrato de níquel y el resto para la fabricación de alúmina. En total un 85% por ciento para este proceso que se divide en partes iguales entre la energía que se consume al producir el producto y la otra parte es para soda cáustica. El primer valor puede variar dependiendo el mix energético que se escoja. En nuestro caso como ya se ha explicado en puntos anteriores, hemos escogido el de España. Los indicadores que tenemos para el nivel II/III están completamente producidos por el nitrato de níquel. Dentro de este proceso, como ya es lo habitual, la parte más impactante es la fabricación del óxido de níquel.

Por último, para acabar con los resultados que nos da el análisis a la fabricación de transportador, se ha presentado el RDW (Resource Depletion Water) que es de nivel III. En este caso se puede observar que un 70% está producido por la fabricación de alúmina. Dentro de este proceso dicho porcentaje se divide entre un 32% producido por la soda cáustica, un 21% por las emisiones que producen la electricidad utilizada en el procesos completo, un 14% producido por la extracción de la bauxita utilizada y por último un 3% que se emite debido a la extracción del calcio. El 30% restante del total del indicador, se produce en la fabricación del nitrato de níquel pero en este caso no es por el óxido si no por el ácido nítrico utilizado.

Como conclusión de este apartado cabe decir que las tres fases de preparación del transportador son importantes desde el punto de vista ambiental y que dependiendo de qué indicador se quiera disminuir, hay que incidir en uno u otro.

#### 2.4.2. IMPACTOS CENTRAL CLC

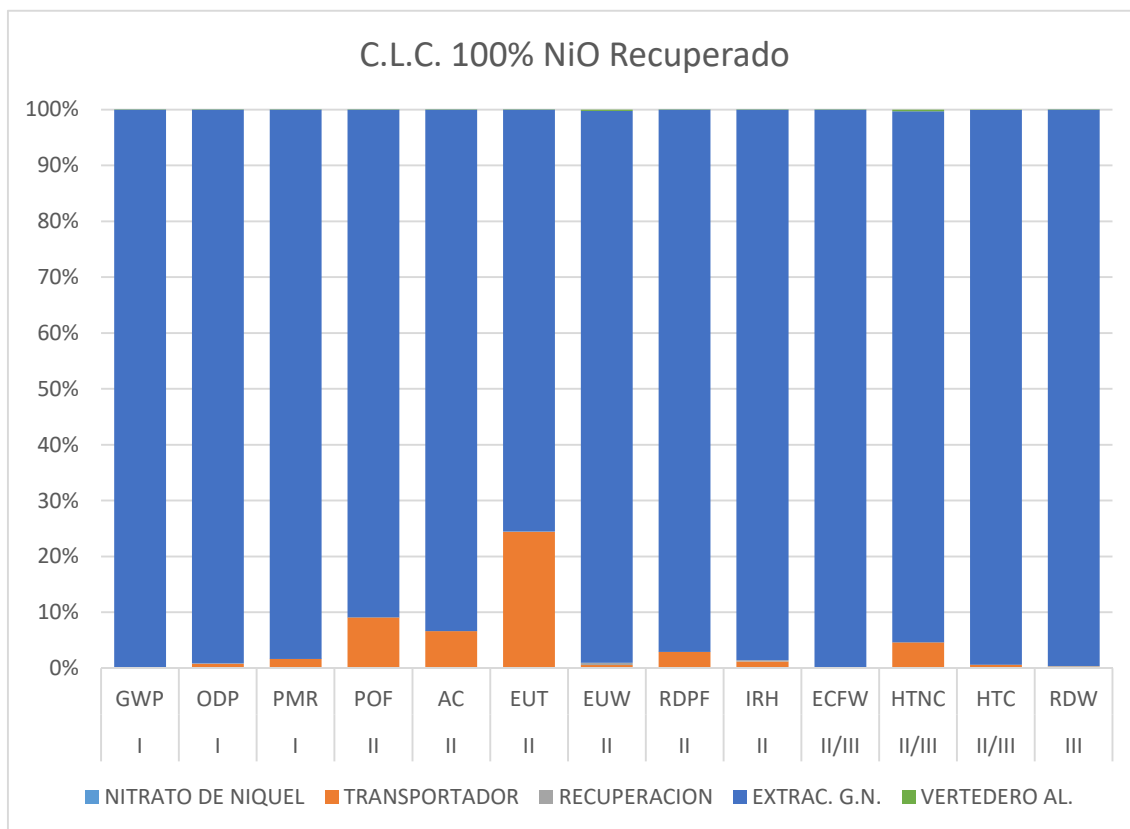
En este apartado se van a mostrar los impactos del C.L.C, con el óxido de níquel recuperado en su totalidad, recuperando un 90% y un 75%. En la Figura 12 se presenta el balance de masa del ACV considerando un 100 % de recuperación de óxido de níquel.



**Figura 12.** Esquema de la simulación con recuperación 100% de NiO.

Del proceso de producción de Nitrato de níquel, colocado en la parte inferior izquierda de la imagen, se puede observar cómo sale un flujo de 820 kg. Esta cantidad es la necesaria para elaborar 1200 kg de transportador de los cuales 600 son para poder poner la central en marcha y los otros 600 kg son para reponerlos conforme vayan perdiendo su propiedad. Como se puede ver, la masa del transportador utilizada a lo largo de 25 años es de  $1,15E+07$  kg, de los cuales  $9,43E+06$  son de  $Al_2O_3$ , y  $2,07E+06$  son de NiO. El NiO virgen sólo supone un pequeño porcentaje del NiO utilizado a lo largo de los 25 años, ya que este es recuperado por reacción con  $HNO_3$ . El total de masa de  $HNO_3$  utilizado tanto para producir en  $Ni(NO_3)_2$  virgen, como el obtenido a partir del reutilizado, es de  $3.48E+06$  kg (Tabla 1).

En la siguiente figura vamos a observar representados en una gráfica los porcentajes de contribución de cada fase de la vida de la planta de CLC al valor global del indicador (Figura 13).



**Figura 13.** Porcentajes de contribución al valor global de indicadores de cada una de las fases de la vida de la central CLC con recuperación total de NiO.

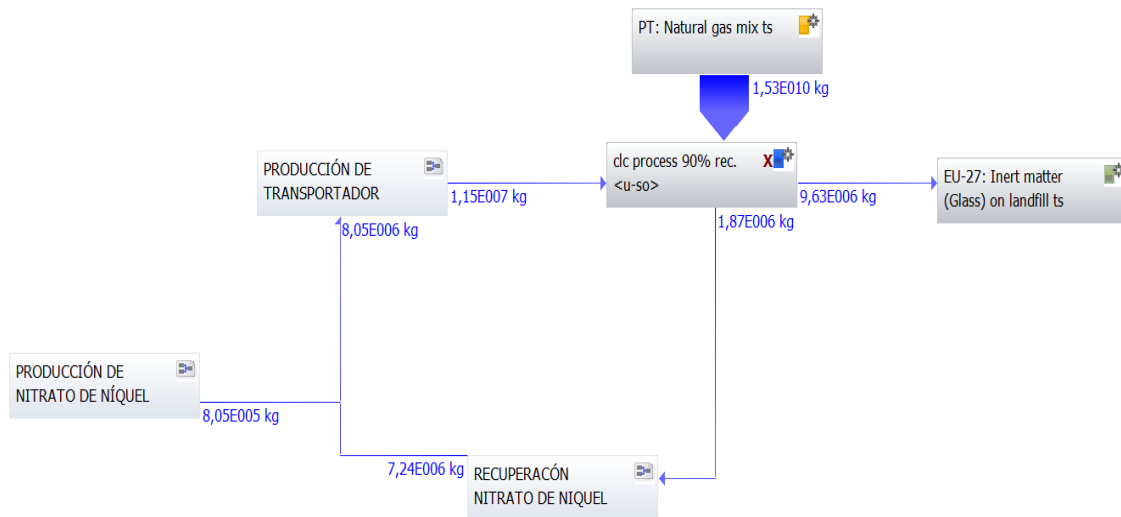
Según los resultados que se pueden apreciar en la Figura 13, se puede deducir claramente que el proceso que más emisiones perjudiciales proporciona es la extracción y transporte de gas natural.

Haciendo una lectura más detallada, se puede deducir que la producción de transportador afecta realmente poco. En el indicador de la eutrofización de la tierra tiene una presencia de un 25%, debido a los óxido de nitrógeno expulsados durante las dos calcinaciones que se realizan al producir el transportador. Este proceso también tiene algo de presencia en otros indicadores como son el AC, RDPF y HTNC pero su presencia es mínima, inferior al 10%.

El proceso que se dedica a la fabricación de nitrato de níquel y el de la recuperación no tiene presencia en estos resultados. En el caso del primero se debe a que su aportación en cuanto a cantidad es mínima con respecto al resto de procesos. Del segundo proceso mencionado hay que destacar que a pesar del alto volumen de ácido nítrico utilizado, sus impactos no contribuyen con porcentajes significativos a los valores finales.

Lo comentado en el párrafo anterior también ocurre con el vertedero en el que se deposita la alúmina, ya que no tiene presencia en ningún indicador. Esto se debe a que estos tipos de residuos son materias inertes, los cuales no experimentan transformaciones químicas ni biológicas. Por lo tanto no producen emisiones que se represente mediante los indicadores utilizados

A continuación se va a presentar el esquema con el cual se ha simulado la acción de recuperación de un 90%. Como se va a ver el esquema tiene los mismos procesos que el anterior pero no las mismas cantidades de flujos ya que en este caso el 10% de NiO que sale de la central es en forma de residuo. También la cantidad de nitrato de níquel virgen es de  $8,05E+05$  kg, un valor mucho más alto que los 820 kg del caso anterior.



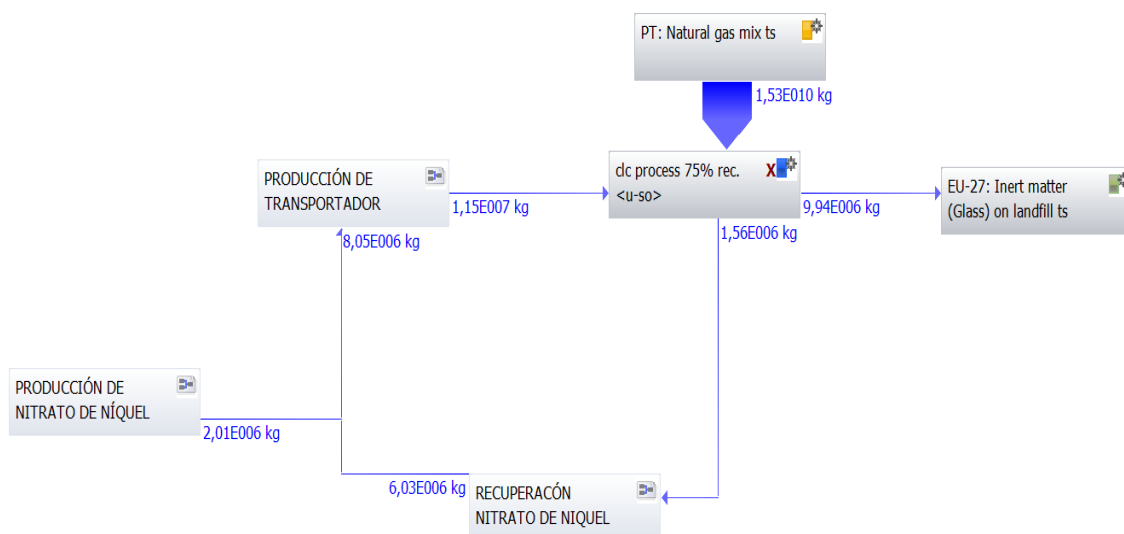
**Figura 14.** Simulación de la central CLC con recuperación de 90% de NiO.

En la Figura 14, aunque los procesos siguen siendo los mismos, algunos de los flujos han cambiado aumentando su cantidad o disminuyendo, dependiendo el caso. La cantidad de gas natural y transportador se mantiene de la misma forma que en la simulación anterior, así como la cantidad de nitrato de níquel que entra en el proceso de generación de transportador. La fase que elabora el nitrato de níquel que no utiliza ninguna salida de la central ahora produce mayor cantidad, mientras que el proceso de recuperación produce menos. Esto se debe a que, como ya se ha explicado antes, parte del óxido de níquel se lleva al vertedero y la cantidad que se lleva a recuperar es menor.

También se puede observar como la cantidad de residuo que se destina al vertedero es superior. Esto se debe a que como ya se ha comentado antes el NiO en forma de residuo se ha simulado con el mismo flujo que los residuos de alúmina.

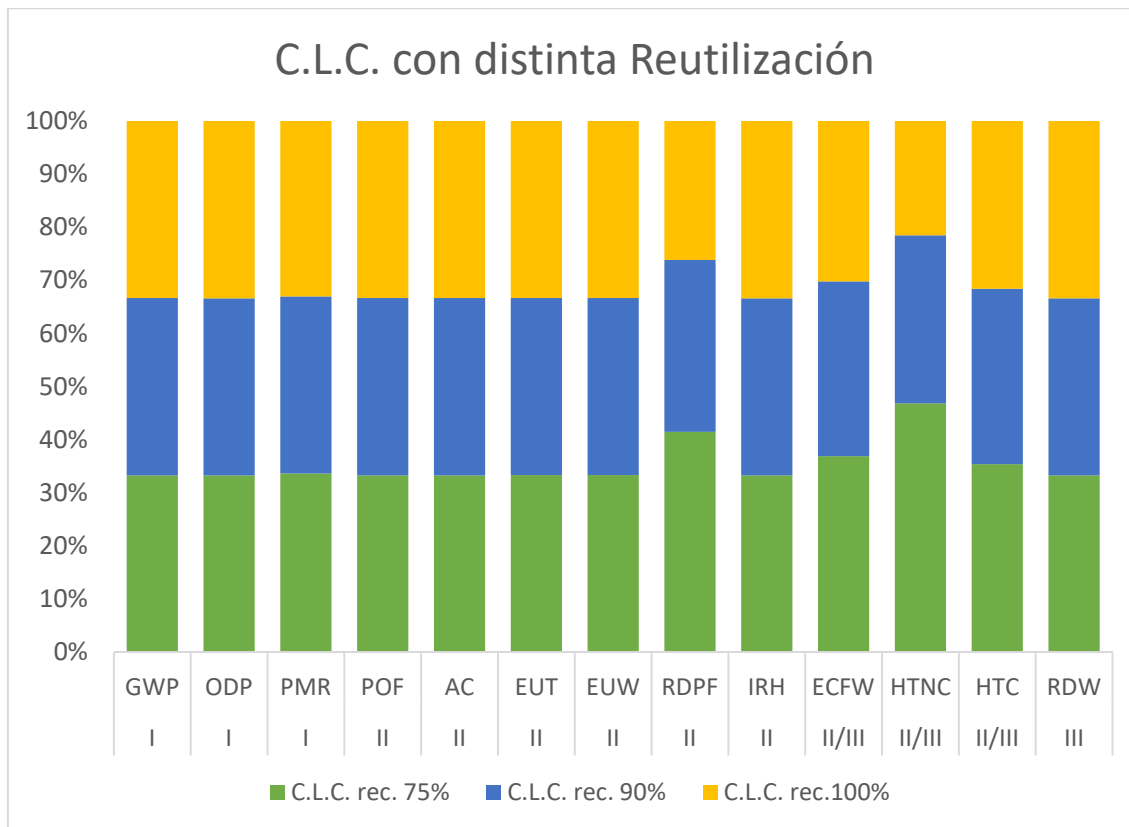
En la siguiente figura se va a poder ver la simulación de la central de CLC pero con un 75% de recuperación de óxido de níquel para producir nuevamente transportador (Figura 15).





**Figura 15.** Simulación de la central CLC con recuperación de 75% de NiO.

La simulación de este proceso ha sido idéntica a las anteriores, salvo que se han modificado los flujos. Como se puede ver la producción de nitrato de níquel es mayor, al igual que la salida de alúmina y óxido de níquel al vertedero. Por el contrario la salida de óxido de níquel que va desde la central hasta la fase de recuperación ha perdido en cantidad y con ello la salida del proceso de recuperación. Como en los casos anteriores, la central sigue consumiendo las mismas cantidades de transportador y de gas natural.



**Figura 16.** Contribución de los distintos escenarios de recuperación a los valores finales.

A partir de la Figura 16, en la que se representa la contribución de cada escenario (distintos % de reciclado) al valor global del indicador, se puede deducir que por lo general, la reutilización afecta de manera considerable en cinco de los trece indicadores utilizados, que son precisamente los indicadores en los que la síntesis de nitrato de níquel tenía lago de relevancia en la Figura 13. En dos de ellos apenas se aprecia su influencia pero aunque sea pequeña se debe de tener en cuenta. Estos son los indicadores HTC, IRH y ECFW.

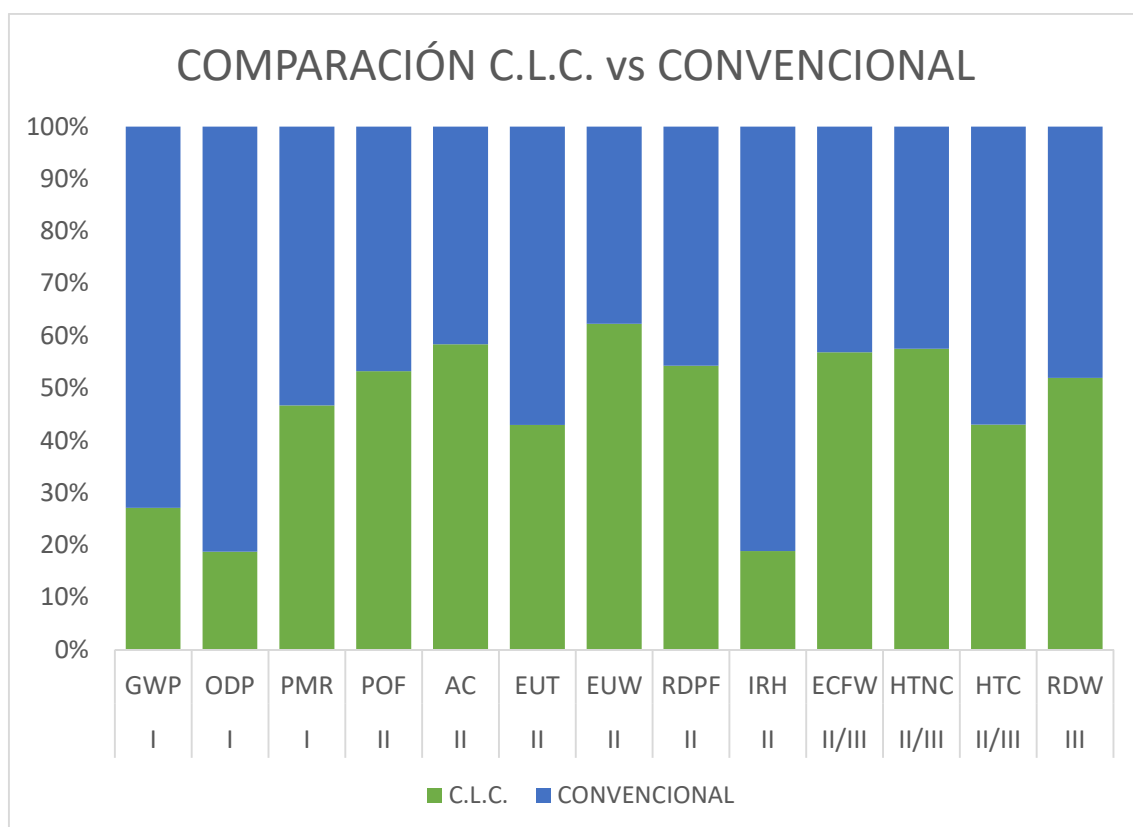
En los que sí que se nota la diferencia del porcentaje de recuperación es en el RDPF, que nos indica los recursos fósiles y minerales desgastados y en el HTNC que nos representa las emisiones tóxicas, no cancerígenas para el ser humano. En el primero de los dos, se ve que el proceso en el cual se recupera un 75% del NiO, adquiere un porcentaje superior al 40%, mientras que en el caso extremo (recuperación 100%) solo obtiene un 25%. El caso intermedio, 90% de recuperación, presenta algo menos del 35%.

Para el caso de las emisiones tóxicas no cancerígenas la diferencia aun es mayor. En el tercer escenario se producen el 48% de las emisiones totales, el 20% más que en el caso de recuperar el 90% de NiO. Como se puede ver este indicador se dispara conforme aumenta la producción de nitrato de níquel ya que si lo comparamos con el primer caso, es mas del doble las emisiones que se producen cuando recuperamos solo el 75%. El causante de tal aumento dentro de la producción del nitrato de níquel es el óxido de níquel necesario para fabricar dicho producto.

### 2.4.3. COMPARACIÓN CENTRAL CONVENCIONAL vs C.L.C

Una vez analizados los resultados de forma individual, en este punto vamos a comparar las dos centrales. Se presentaran a continuación tres gráficas de las cuales podremos extraer diferentes conclusiones, ya que en la primera mostraremos los resultados para todos los indicadores con el proceso de recuperación de óxido de níquel al 100% frente al proceso convencional. En la segunda se hará lo mismo pero con el proceso de recuperación al 75%. La tercera será diferente ya que nos centraremos en las emisiones de CO<sub>2</sub> por kW producido.

Como en casos anteriores, se va a presentar unas gráficas con la contribución, en este caso de la central CLC y la convencional, al valor global del indicador.



**Figura 17.** Contribución de CLC con recuperación total y central convencional al valor total de cada uno de los indicadores.

Esta gráfica es la que nos va a determinar qué proceso es más impactante; por lo tanto, es la que más importancia le vamos a dar a la hora de sacar las conclusiones. Vamos a ir nombrando cada indicador al igual que ha hecho en el apartado 2.4.1. para explicar por qué se dan estos resultados.

Empezamos con el GWP que nos indica el calentamiento global. Se puede ver que la central convencional obtiene más de un 70% del total, lo cual nos dice que dicha central afecta en este indicador casi tres veces más que la central que utiliza transportador de oxígeno. Para el ODP aún es más favorable el resultado que el

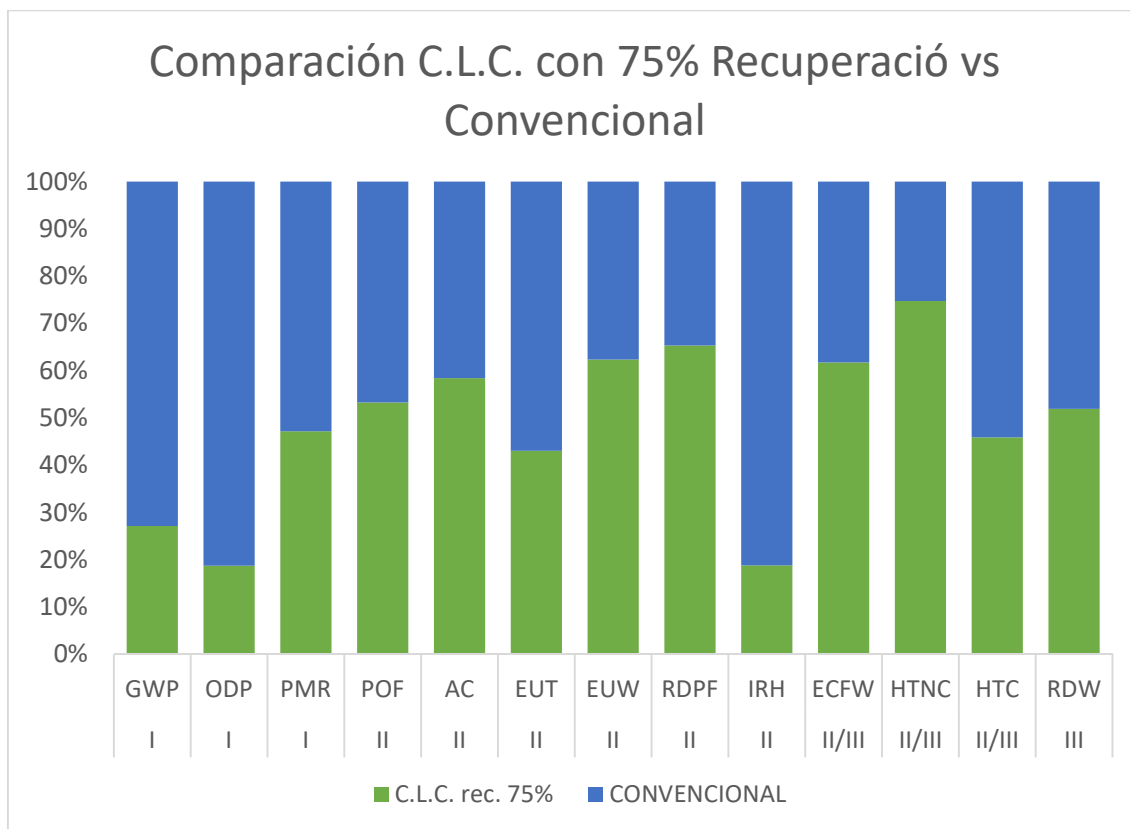
anterior indicador ya que la central de CLC obtiene algo menos de un 20%. Por lo tanto podemos afirmar que la central convencional emite cuatro veces más las emisiones que afectan al desgaste de la capa de Ozono que la que posee la tecnología de captura de CO<sub>2</sub>. En el caso del PMR los resultados son bastante similares, aunque sí que es verdad que la diferencia es menor a un 5%.

Para el POF sería difícil determinar qué proceso es el que mayor porcentaje tiene ya que está mucho más igualado que el anterior. El siguiente indicador de nivel II que tenemos que observar es la acidificación (AC). Este es el primero que no es favorable para la central CLC ya que obtienen un valor del 60%. Esto se debe principalmente a la extracción del gas natural y como por motivos de eficiencia y rendimiento es necesaria mayor cantidad en dicho caso. También la producción del transportador produce emisiones que afectan a este indicador.

En el siguiente indicador, el EUT la central de CLC vuelve a adquirir valores menores que la convencional, un 40% frente a un 60% respectivamente. Pero por el contrario en el EUW pasa al revés ya que es ahora la central convencional la que tiene un 40% mientras que la de CLC adquiere un 60%. Por lo tanto las centrales que capturan el CO<sub>2</sub> son más beneficiosas para la eutrofización del terreno mientras que no lo son para el agua. El indicador RDPF, de nivel II, y los indicadores que pertenecen al nivel II / III ECfW y el HTNC y el de nivel III RDW nos indican que ambos procesos tiene impactos similares.

Los dos últimos resultados que se van a explicar de la Figura 18 son el IRH y el HTC. Para el indicador que nos muestra la radiación iónica (IRH) podemos decir que es en el que menor valor adquiere la central de CLC incluso por debajo del ODP. Algo más de un 15% del total. Conforme a las emisiones tóxicas y cancerígenas para el ser humano se decantan con un 60% para las centrales convencionales y un 40% para las de CLC

Como se ha dicho anteriormente, también se va a comparar una central convencional frente a una de CLC que recupera el 75% de los óxidos de níquel. En la siguiente figura se analizan los resultados obtenidos (Figura 18).



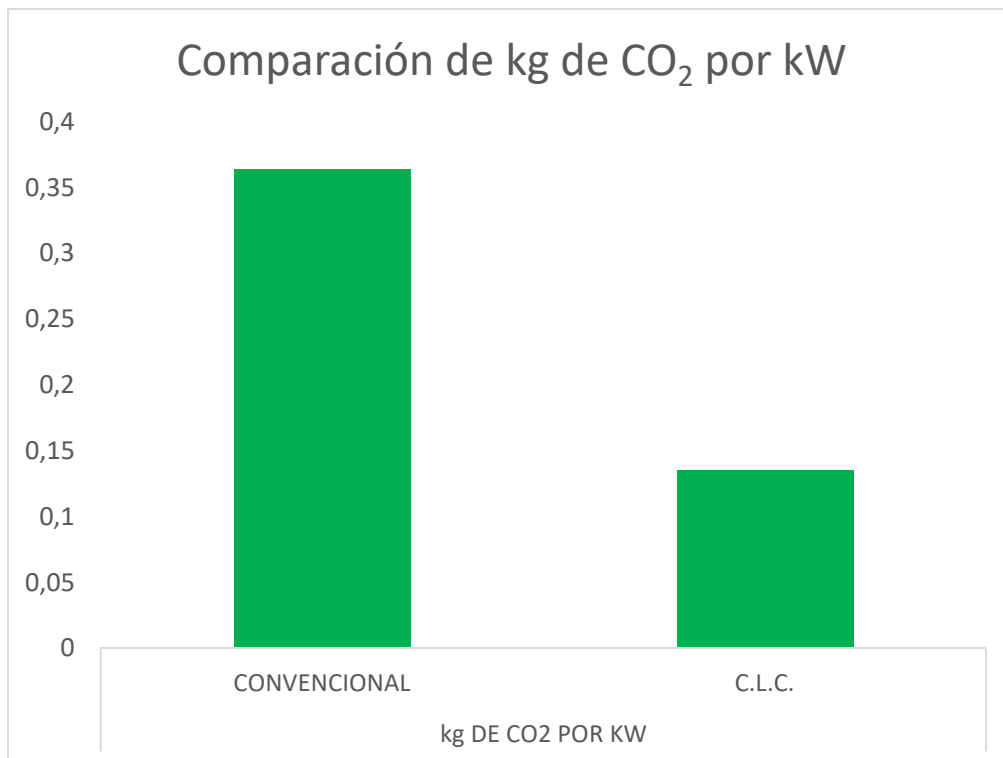
**Figura 18.** Resultados de la central CLC con recuperación de 75% de NiO.

Como se puede ver los resultados varían poco con respecto a los iniciales en los que se recuperaba por completo el óxido de níquel. Los indicadores que estaban claramente definidos a favor de las centrales de CLC se mantienen de la misma forma (GWP, ODP y el IRH) Como ya se ha comentado antes esto se produce porque los residuos de la central que varían bastante conforme a los del primer escenario en cuanto a cantidad, son inertes. También se debe añadir que aunque la producción de nitrato de níquel ha aumentado, este factor tampoco es representativo en estos indicadores. Los indicadores que más aumentaban con el descenso del porcentaje de reciclado en la Figura 16 son los que ahora empeoran la comparación (RDPF y HTNC), ya que son para estos dos para los que la central CLC gana más importancia en la Figura 18.

Por lo tanto, se puede afirmar que las centrales de CLC deben de reutilizar todo el óxido de níquel y recuperarlo para que sean menos agresivas con el medio ambiente. En este trabajo se podría pensar que este porcentaje no tiene importancia, y que la fabricación de mayores cantidades de nitrato de níquel virgen no parece tener gran influencia en el estudio, pero también hay que resaltar que se han considerado los óxidos níquel como inertes, y el níquel es un metal pesado de toxicidad elevada en aguas. Sería necesario un estudio detallado sobre la lixiviación de estos sólidos en vertederos para concluir que es inerte.

Para finalizar el apartado de resultados se ha obtenido una gráfica en la cual se representan las emisiones de CO<sub>2</sub> por cada kW<sub>e</sub> producido para los dos casos de central convencional y de central CLC con 100 % de reciclado de sólidos. Estos datos

se han obtenido de las emisiones totales de ambas centrales y dividiéndolos entre la cantidad total de electricidad producida y entre el tiempo en el que se han estado produciendo.



**Figura 19.** Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub> por kW<sub>e</sub>.

De esta última gráfica podemos decir que la mayor cantidad de CO<sub>2</sub> que emiten las centrales es debido a la combustión ya que es la gran diferencia entre ambas centrales Figura 19. Si los resultados hubiesen sido al contrario podríamos discutir si son por el mismo motivo o por la producción de transportador.

Si nos centramos en los datos, la central convencional, emite 0,35 Kg de CO<sub>2</sub> por kW<sub>e</sub> mientras que la cantidad que se emiten en la planta de CLC es de 0,135 Kg de CO<sub>2</sub> por kW<sub>e</sub> producido. Esta es una diferencia bastante considerable ya que dicho dato es para la generación de kW<sub>e</sub>.

Como resultado característico de esta gráfica se puede confirmar que la central convencional produce más del doble de emisiones de CO<sub>2</sub> que la que utiliza transportadores de oxígeno.

### 3\_ CONCLUSIONES

- La principal conclusión de este trabajo es que los sistemas CLC son menos impactantes que la combustión convencional.

Como se ha visto en el apartado de 2.4.3 Comparación de Resultados, las centrales que utilizan transportadores de oxígeno, aunque no terminan de tener menor porcentaje en todos los indicadores, para los tres indicadores de nivel I se produce una reducción de los impactos. Para el resto de indicadores, hay menos diferencias y en la mayoría de los casos sus impactos son similares, salvo para el caso del indicador IRH, que cuenta con mucho menos impacto para el CLC.

- Para el caso de indicador GWP, las mejoras son evidentes, ya que para el caso de CLC se producen 0,135 kg CO<sub>2</sub> Eq. por kW eléctrico generado, mientras que la central convencional produce 0,35 kg CO<sub>2</sub> Eq. por kW<sub>e</sub> producido.

Viendo la Figura 19 se puede deducir fácilmente esta conclusión ya que la parte que representa a las emisiones de la central convencional son casi tres veces mayores que las de C.L.C.

- Para la producción del transportador, el proceso más impactante es la fabricación de nitrato de níquel, aunque las dos etapas restantes de fabricación del soporte y de calcinación, también influyen en los indicadores.

Como se puede ver en el primer apartado de resultados en el que se presentan los impactos de la creación del transportador, la fabricación del nitrato de níquel aparece en la mayoría de los indicadores, siendo el más influyente para el GWP. Los procesos de fabricación del soporte influyen en indicadores como ODP e IRH, mientras que los de calcinación en indicadores como POF, AC, y EUT.

- Es necesario recuperar todo el óxido de níquel posible para que las centrales de CLC obtengan menores emisiones que las convencionales.

Como se observa en este estudio, el reciclado o no del transportador influye poco en los valores de los indicadores. Sin embargo, hay que resaltar que se ha considerado el residuo de transportador como sólido inerte, hecho que todavía queda por demostrar. Por eso, podemos concluir que aunque en este estudio no se haya visto su influencia, es conveniente reciclar la mayor parte de transportador posible ya que el uso de ácido nítrico adicional en los reciclados no influye en los resultados finales.

Por último, quisiera proponer acciones de mejora para que este tipo de centrales puedan ser, aún mucho más respetuosas con el medio ambiente.

Desde mi punto de vista se debería intentar, rediseñar los procesos que se producen en la cámara de combustión y en la turbina. Ya que según el estudio realizado a la central que captura el CO<sub>2</sub>, le perjudica bastante la eficiencia de la combustión. Como ya se ha comentado durante el estudio que la eficiencia de la combustión es de un 0,9 en vez de un 0,99 como ocurre en las convencionales. Esto

genera la necesidad de una cantidad mucho mayor tanto de combustible como de transportador.

Otro de los aspectos técnicos a mejorar es el rendimiento de la turbina. En este caso puede estar en concordancia con la combustión, ya que es posible que no genere suficiente calor para elevar los fluidos que mueven las turbinas a altas presiones, como lo hace la combustión convencional.

De este modo, queda penalizada la central de manera que estos dos aspectos hacen que dicha central consuma una cantidad mayor de gas natural y por consecuencia más transportador. Al producir y al combustionar cantidades mayores los indicadores lo notan ya que simultáneamente aumentan las emisiones. Si se lograra aumentar tanto la eficiencia como el rendimiento de las centrales de CLC hasta el punto de igualar estos aspectos con respecto a las centrales convencionales. Los indicadores se reducirían de forma considerada y también se reducirían los Kg de CO<sub>2</sub> por kW.



## 4\_ BIBLIOGRAFÍA

- (ICB-CSIC), I. d. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida*. Zaragoza.
- Agency, I. E. (01 de Abril de 2016). *www.iea.org*. Recuperado el 10 de Abril de 2017, de *www.iea.org*:  
[https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustion\\_Highlights\\_2016.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustion_Highlights_2016.pdf)
- Amóstegui, C. R. (2011). *Combustión de gascon captura de CO2 mediante transportadores sólidos de oxígeno basados en Cu*. Zaragoza.
- Cabbage, M., & McCarthy, L. (15 de Mayo de 2017). <https://climate.nasa.gov>. Obtenido de <https://climate.nasa.gov>: <https://climate.nasa.gov/news/2587/april-2017-was-second-warmest-april-on-record/>
- Cales de Llierca, S. (16 de Marzo de 2017). *Cales de Llierca, S.A.* Obtenido de Cales de Llierca, S.A.: <http://www.calesdellierca.com/es/la-utilidad-del-oxido-de-calcio-cal-viva-en-la-metalurgia/>
- Francisco García Labiano, P. G. (20 de 07 de 2007). *Solid Waste Management of a Chemical-Looping Combustion Plant using Cu-Based Oxygen Carriers*. Obtenido de American Chemical Society.
- Gloria, T. (2013). *The Environmental footprint of semi-finished aluminum products in North America*. The Aluminum Association.
- Jin, E. (2014). *Life cycle assessment of two catalysts used in the biofuel singas cleaning process and analysis of variability in gasification*. China agricultural university, Beijing.
- Landin, P. (2 de Noviembre de 2012). <http://pelandintecno.blogspot.com.es>. Recuperado el 10 de Abril de 2017, de <http://pelandintecno.blogspot.com.es>:  
<http://pelandintecno.blogspot.com.es/2012/11/centrales-de-ciclo-combinado.html>
- Naqvi, R., Wolf, J., & Bolland, O. (31 de Octubre de 2005). *Elsevier*. Obtenido de Elsevier: [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)
- Rivera, J. (20 de 03 de 2017). *Mas Mineral Metal*. Obtenido de Mas Mineral Metal: <http://masmineralmetal.com/es/glosario/42-los-combustibles>
- IPCC (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.